

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Filip Bionda

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Filip Bionda

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem svom mentoru, izv. prof. dr. sc. Ivici Garašiću, na korisnim savjetima, pruženoj podršci i primjedbama tijekom izrade ovog rada.

Hvala višem asistentu dr. sc. Matiji Bušiću na velikoj pomoći, susretljivosti, strpljenju i vođenju kroz rad.

Zahvaljujem djelatnicima Laboratorija za zavarivanje i Laboratorija za zaštitu materijala Fakulteta strojarstva i brodogradnje na pomoći i strpljenju pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Također od srca zahvaljujem svojoj obitelji na ukazanoj podršci koju su mi pružili tijekom studija.

Filip Bionda



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **FILIP BIONDA** Mat. br.: **0035189215**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Automatizirano TIG zavarivanje cijevi iz nehrđajućih čelika**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Automated TIG welding of stainless steel pipes**

Opis zadatka:

Proučiti TIG zavarivanje visokolegiranih nehrđajućih čelika, te zaštitne plinove koji se koriste. Navesti i pojasniti utjecaj svih parametara u TIG zavarivanju. Opisati primjere automatizacije TIG postupka zavarivanja. Detaljno analizirati probleme plinske zaštite korijenske strane zavarenog spoja te moguće pogreške koje se pojavljuju.

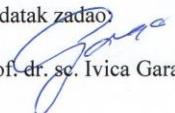
U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je definirati parametre za automatizirano TIG zavarivanje cijevi iz visokolegiranih nehrđajućih čelika. Zavarivanje provesti sa plinskom zaštitom korijenske strane uz primjenu različitih mješavina. Zavarene spojeve ispitati metodama sa i bez razaranja te posebnu pažnju posvetiti ispitivanju na djelovanje korozije. Donijeti zaključke na temelju provedenih ispitivanja o prihvatljivosti odabranih parametara zavarivanja i provedenoj plinskoj zaštiti.

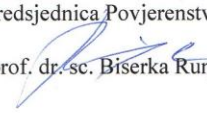
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
27. rujna 2018.

Rok predaje rada:
29. studenog 2018.

Predvideni datum obrane:
05. prosinca 2018.
06. prosinca 2018.
07. prosinca 2018.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. PODJELA I PRIMJEMA NEHRĐAJUĆIH ČELIKA U ZAVARENIM KONSTRUKCIJAMA.....	2
2.1. O nehrđajućim čelicima	2
2.1.1. Feritni nehrđajući čelici	5
2.1.2. Martenzitni nehrđajući čelici	7
2.1.3. Austenitni nehrđajući čelici	10
2.1.4. Dupleks (austenitno – feritni) nehrđajući čelici	12
3. RUČNO I AUTOMATIZIRANO TIG ZAVARIVANJE	15
3.1. Općenito o TIG postupku zavarivanja	15
3.2. Princip rada TIG zavarivanja	17
3.3. Oprema za TIG zavarivanje	19
3.3.1. Izvor struje	20
3.3.2. Pištolj za zavarivanje i sapnica	23
3.3.3. Netaljiva volframova elektroda.....	25
3.3.4. Rashladni sustav i sustav za dovod plina	28
3.4. Vrste TIG zavarivanja prema stupnju automatizacija	29
3.4.1. Ručno TIG zavarivanje	29
3.4.2. Poluautomatizirano TIG zavarivanje	30
3.4.3. Automatizirano TIG zavarivanje	30
3.4.4. Automatizirano TIP TIG zavarivanje	31
3.4.5. Automatizirani postupak orbitalnog zavarivanja cijevi	33
3.4.5.1. Zatvorene glave za zavarivanje.....	36
3.4.5.2. Otvorene glave za zavarivanje	36
3.4.5.3. Glave za zavarivanje u cijevnu stijenku.....	37
3.5. Parametri kod TIG zavarivanja	38
3.5.1. Jakost struje zavarivanja	38
3.5.2. Brzina zavarivanja.....	40
3.5.3. Protok i vrsta zaštitnog plina.....	40
4. PODJELA I PRIMJENA ZAŠTITNIH PLINOVA ZA TIG ZAVARIVANJE NEHRĐAJUĆIH ČELIKA.....	42
4.1. Fizikalne karakteristike zaštitnog plina.....	43
4.1.1. Ionizacijski potencijal	43
4.1.2. Toplinska vodljivost.....	43
4.1.3. Disocijacija i rekombinacija.....	43

4.1.4.	Čistoća plina.....	43
4.1.5.	Gustoća plina.....	44
4.2.	Opis zaštitnih plinova kod TIG zavarivanja.....	44
4.2.1.	Argon	45
4.2.2.	Helij.....	45
4.2.3.	Vodik.....	46
4.2.4.	Dušik	46
4.3.	Karakteristike argona i helija	46
4.4.	Plinske mješavine.....	48
4.4.1.	Zaštita korijena zavora	50
4.4.2.	Utjecaj zaštitnih plinova na mehanička svojstva zavora	53
4.4.3.	Pogreške u zavarenim spojevima uzrokovane zaštitnim plinom	55
5.	ISPITIVANJE OTPORNOSTI NA KOROZIJU KOD ZAVARENIH SPOJEVA NEHRĐAJUĆIH ČELIKA.....	57
5.1.	Oblici korozije kod nehrđajućih čelika	57
5.1.1.	Korozija u procjepu.....	58
5.1.2.	Rupičasta korozija (pitting).....	58
5.1.3.	Interkristalna korozija	59
5.1.4.	Napetosna korozija.....	60
5.2.	Ispitivanje rupičaste korozije	61
5.2.1.	Elektrokemijska metoda.....	61
5.2.2.	Neelektrokemijska metoda.....	62
5.2.3.	Utjecaj zavarivanja na rupičastu koroziju.....	62
6.	EKSPERIMENTALNI RAD.....	63
6.1.	Opis eksperimenta.....	63
6.2.	Osnovni materijal.....	63
6.3.	Oprema za zavarivanje.....	64
6.3.1.	Izvor struje za zavarivanje	65
6.3.2.	Okretaljka.....	67
6.3.3.	Zaštitni plin	67
6.3.4.	Netaljiva volframova elektroda.....	68
6.4.	Zavarivanje.....	68
6.4.1.	Priprema spoja.....	68
6.4.2.	Proces zavarivanja.....	69
6.4.2.1.	Parametri zavarivanja.....	70
6.4.3.	Rezultati zavarivanja.....	72
6.5.	Izrada uzoraka za ispitivanja.....	73
6.6.	Ispitivanja i analiza	75
6.6.1.	Vizualna kontrola.....	75
6.6.2.	Makroanaliza.....	75
6.6.3.	Korozijska ispitivanja	77
7.	ZAKLJUČAK.....	80
	LITERATURA.....	81

POPIS SLIKA

Slika 1.	Primjena nehrđajućih čelika u industriji podijeljena u kategorije [1]	2
Slika 2.	Svjetska proizvodnja nehrđajućih čelika [1]	3
Slika 3.	Mehanizam samoobnavljanja pasivnog filma [2].....	4
Slika 4.	Mehanizam samoobnavljanja pasivnog filma [2].....	5
Slika 5.	Prikaz karakterističnih problema kod zavarivanja feritnih nehrđajućih čelika	6
Slika 6.	Mikrostruktura martenzitnog nehrđajućeg čelika [1]	7
Slika 7.	Prikaz karakterističnih problema kod zavarivanja martenzitnih nehrđajućih čelika [2]	8
Slika 8.	Mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika [1].....	10
Slika 9.	Prikaz karakterističnih problema kod zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika [9]	11
Slika 10.	Mikrostruktura austenitno – feritnog (dupleks) nehrđajućeg čelika [3].....	12
Slika 11.	Prikaz karakterističnih problema kod zavarivanja austenitno – feritnih (dupleks) nehrđajućih čelika austenitno – feritnog (dupleks) nehrđajućeg čelika [2].....	14
Slika 12.	Ručno TIG zavarivanje [13].....	16
Slika 13.	Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [14]	17
Slika 14.	Položaj elektrode i dodatnog materijala u odnosu na radni komad [11]	18
Slika 15.	Izvođenje sučeonog (lijevo) i preklopnog (desno) spoja [15]	19
Slika 16.	Izvođenje kutnog (lijevo) i rubnog (desno) spoja [15].....	19
Slika 17.	Dijelovi uređaja za TIG zavarivanje [16]	20
Slika 18.	Strmo padajuća karakteristika izvora struje za TIG zavarivanje [18]	21
Slika 19.	Osnovne karakteristike različitih pravokutnih impulsnih oblika [20].....	22
Slika 20.	Presjek pištolja za TIG zavarivanje sa sustavom hlađenja [12]	23
Slika 21.	Stabilan i nestabilan protok zaštitnog plina [13]	24
Slika 22.	Brušenje volframove elektrode [23].....	27
Slika 23.	Vrsta električnog luka ovisno o brušenju volframovih elektroda [21].....	27
Slika 24.	Boce zaštitnog plina [16].....	28
Slika 25.	Primjer robotiziranog (desno) i automatiziranog (lijevo) zavarivanja [37].....	29
Slika 26.	Pištolj za poluautomatizirano TIG zavarivanje [24]	30
Slika 27.	Usporedba količine nataljenog materijala pri TIG zavarivanju s hladnom i vrućom žicom [25].....	33
Slika 28.	Primjer orbitalnog TIG zavarivanja [26]	34
Slika 29.	Shematski prikaz orbitalnog sustava za zavarivanje [26].....	35
Slika 30.	Primjer zatvorene glave za zavarivanje [42]	36
Slika 31.	Primjer otvorene glave za zavarivanje s AVC kontrolorom [26].....	37
Slika 32.	Primjer glave za zavarivanje u cijevnu stjenku [26]	37
Slika 33.	Smjer gibanja nosilaca naboja i intenzivnost zagrijavanja ovisno o vrsti i polaritetu struje [19]	39
Slika 34.	Utjecaj zaštitnih plinova i plinskih mješavina na izgled zavara.....	44
Slika 35.	Veza napona i struje električnog luka u odnosu na zaštitne plinove argon i helij [29]	47
Slika 36.	Električni luk i izgled zavara kod zavarivanja zaštitnim plinom argonom/helijem [28]	48
Slika 37.	Utjecaj vrste plina i mješavine plinova na oblik zavara i penetraciju [26]	50
Slika 38.	Zaštita korištena zavara u obliku kućišta [6]	51

Slika 39.	Zaštita korijena zavara pomoću bakrene pločice [36]	51
Slika 40.	Zaštita korijena zavara u obliku kućišta [36]	52
Slika 41.	Zaštita korijena zavara cijevi pomoću poklopaca [36]	52
Slika 42.	Utjecaj dodavanja dušika argonu na mehanička svojstva zavara [38]	53
Slika 43.	Utjecaj dušika na brzinu zavarivanja [38]	54
Slika 44.	Hladna pukotina u ZUT-u sučeljenog spoja [40]	56
Slika 45.	Poroznost u sučeljenom spoju [39]	56
Slika 46.	Oblici jamica kod rupičaste korozije [30]	59
Slika 47.	Shematski prikaz određivanja otpornosti prema rupičastoj koroziji elektrokemijskim metodama [34]	61
Slika 48.	Rupičasta korozija u području zavarenog spoja [31]	62
Slika 49.	Cijevi iz nehrđajućeg čelika	64
Slika 50.	Radno mjesto u Laboratoriju za zavarivanje	65
Slika 51.	Uređaj za zavarivanje tipa MagicWave 2200 Job G/F	66
Slika 52.	Okretaljka proizvođača „Iskra varjenje“	67
Slika 53.	Sredstva za pripremu površine osnovnog materijala	68
Slika 54.	Sučeljeni spoj s „I“ pripremom	69
Slika 55.	Prikaz stanja neposredno prije početka zavarivanja	70
Slika 56.	Prikaz lica zavara (zaštitni plin Inoxline H5 – desno, zaštitni plin Argon 4.8 – lijevo)	72
Slika 57.	Prikaz korijena zavara (zaštitni plin Inoxline H5 – desno, zaštitni plin Argon 4.8 – lijevo)	72
Slika 58.	Izrezivanje uzoraka	73
Slika 59.	Izrezani uzorci za korozijska ispitivanja (zaštitni plin Inoxline H5 – lijeva dva uzorka, zaštitni plin Argon 4.8 – desna dva uzorka)	73
Slika 60.	Makroizbrusak u plastici (zaštitni plin Inoxline H5 – dolje, zaštitni plin Argon 4.8 – gore)	74
Slika 61.	Makroizbrusak (zaštitni plin Inoxline H5)	76
Slika 62.	Makroizbrusak (zaštitni plin Argon 4.8)	76
Slika 63.	Prikaz uzoraka u agresivnoj otopini neposredno nakon uranjanja	77
Slika 64.	Prikaz uzoraka u agresivnoj otopini neposredno prije vađenja	78
Slika 65.	Usporedba zavara prije i poslije ispitivanja (zaštitni plin – Inoxline H5)	78
Slika 66.	Usporedba zavara prije i poslije ispitivanja (zaštitni plin – Argon 4.8)	79

POPIS TABLICA

Tablica 1. Označavanje volframovih elektroda [11]	25
Tablica 2. Vrijednosti koeficijenata opterećenja elektroda za razne vrste volframovih elektroda [11].....	26
Tablica 3. Standardni zaštitni plinovi i njihova primjena kod TIG zavarivanja [27]	41
Tablica 4. Preporučeni zaštitni plinovi prilikom zavarivanja pojedinih materijala [28]	42
Tablica 5. Usporedba karakteristika zavarivanja pri korištenju različitih zaštitnih plinova [18]	49
Tablica 6. Mehanička svojstva čelika AISI 316L prema normi HRN EN 10088-3:2014 [43]	63
Tablica 7. Kemijska svojstva čelika AISI 316L prema normi HRN EN 10088-3:2014 [43]	64
Tablica 8. Karakteristike uređaja za zavarivanje MagicWave 2200 Job G/F [44]	66
Tablica 9. Primijenjeni parametri pri zavarivanju	71
Tablica 10. Geometrijske značajke zavara	76
Tablica 11. Usporedba korozijske postojanosti zavara uz korištenje različitih zaštitnih plinova	79

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
<i>AC</i>	-	Alternating current (izmjenična struja)
<i>AISI</i>	-	Američki institut za željezo i čelike
<i>A₅</i>	%	Istezanje
<i>d</i>	mm	Promjer elektrode
<i>DC</i>	-	Direct current (istosmjerna struja)
<i>GTAW</i>	-	Gas Tungsten Arc Welding
<i>HB</i>	-	Tvrdoća prema Brinellu
<i>I</i>	A	Jakost struje
<i>k</i>	-	Koeficijent toplinske iskoristivosti zavarivanja
<i>R_m</i>	N/mm ²	Vlačna čvrstoća
<i>R_{p0,2}</i>	N/mm ²	Granica razvlačenja
<i>U</i>	V	Napon
<i>v_z</i>	cm/min	Brzina zavarivanja
<i>ZUT</i>	-	Zona utjecaja topline
<i>Q</i>	kJ/mm	Unos topline

SAŽETAK

U ovom je radu obrađena problematika TIG zavarivanja materijala iz nehrđajućih čelika. U teorijskom dijelu rada razrađena je podjela i primjena nehrđajućih čelika u zavarenim konstrukcijama, opisano ručno i automatizirano TIG zavarivanje, primjena i podjela zaštitnih plinova za TIG zavarivanje nehrđajućih čelika te ispitivanja otpornosti na koroziju kod zavarenih spojeva nehrđajućih čelika.

U eksperimentalnom dijelu provedeno je automatizirano zavarivanje cijevi iz nehrđajućeg čelika (AISI 316L) uz primjenu dvaju različitih zaštitnih plinova (Inoxline H5 i Argon 4.8). Nakon vizualne kontrole izrađen je makroizbrusak na kojem se vidi presjek zavora u oba slučaja te je provedeno ispitivanje otpornosti na rupičastu koroziju.

Cilj ovog eksperimentalnog rada bio je utvrditi razlike u geometriji zavora i otpornost na koroziju u dvama slučajevima u kojima je jedina razlika korišteni zaštitni plin. Nakon provedenog eksperimenta možemo zaključiti da je zavarivanje provedeno uz zaštitni plin Inoxline H5 te iste ostale parametre zavarivanja kao i u slučaju s Argon 4.8 kao zaštitnim plinom, ostvarilo bolju penetraciju i kvalitetu zavora te se pokazalo da zavareni spoj ima bolju i korozijsku postojanost.

Ključne riječi: TIG zavarivanje, nehrđajući čelici, automatizirano zavarivanje, rupičasta korozija, zaštitni plinovi

SUMMARY

This paper deals with the problem of TIG welding materials from stainless steels. The theoretical part of the paper deals with the division and application of stainless steels in welded constructions, and describes manual and automated TIG welding, the application and distribution of shielding gases for TIG welding of stainless steels, and corrosion resistance tests on welded joints of stainless steels.

In the experimental part, an automated welding of stainless steel pipes (AISI 316L) was carried out using two different shielding gases (Inoxline H5 and Argon 4.8). After visual control, a macroscopic section was created that shows a cross-sectional image of the weld in both cases, and a pitting corrosion resistance test was performed.

The aim of this experimental paper was to determine the differences in the weld geometry and corrosion resistance in the two cases in which different shielding gases were used. The results of the experiment indicate that the welding carried out with Inoxline H5 shielding gas, using the same welding parameters as in the case of Argon 4.8, achieved better penetration and quality of the weld, and proved that the welded joint has better corrosion resistance.

Key words: TIG welding, stainless steels, automated welding, pitting corrosion, shielding gases

1. UVOD

Korozijski postojani ili nehrđajući čelici (*eng. stainless steel*) jedni su od najkorištenijih konstrukcijskih materijala u industriji pa tako i u zavarenim konstrukcijama. Zbog svoje korozijske postojanosti po kojoj su i dobili ime, pogodni su za primjenu u raznim specifičnim uvjetima i okolini. Povećanu otpornost na koroziju imaju zbog svog kemijskog sastava, što im je uostalom i glavna karakteristika. Četiri su osnovne grupe nehrđajućih čelika: martenzitni, feritni, astenitni i duplex (austenitno-feritni) nehrđajući čelici. Karakterizira ih minimalni udio kroma od 10,5 % te dodaci ostalih legirajućih elemenata poput bakra, nikla, molibdena, titana, dušika i ugljika kojima se poboljšavaju njihova struktura i mehanička svojstva.

TIG (*eng. Tungsten Inert Gas*) postupak zavarivanja elektrolučni je postupak kod kojega se električni luk uspostavlja i održava između netaljive elektrode od volframa ili volframovih legura i osnovnog materijala. U početku se upotrebljavao u avionskoj industriji kod zavarivanja lakih metala, nakon čega se proširio i na ostale industrije u kojima su se koristili aluminij, bakar i nehrđajući čelici. Proces zavarivanja kod TIG postupka štiti se od djelovanja okolne atmosfere tako da se inertni (neaktivni) plinovi upuhuju kroz sapnicu koja je koaksijalno smještena oko netaljive elektrode. Od inertnih zaštitnih plinova najčešće se koriste: argon (Ar), helij (He) ili mješavina argona i helija.

U ovom radu obradit će se problematika TIG zavarivanja materijala iz nehrđajućih čelika. U sklopu rada razrađena je podjela i primjena nehrđajućih čelika u zavarenim konstrukcijama, opisano ručno i automatizirano TIG zavarivanje, primjena i podjela zaštitnih plinova za TIG zavarivanje nehrđajućih čelika te ispitivanja otpornosti na koroziju kod zavarenih spojeva nehrđajućih čelika.

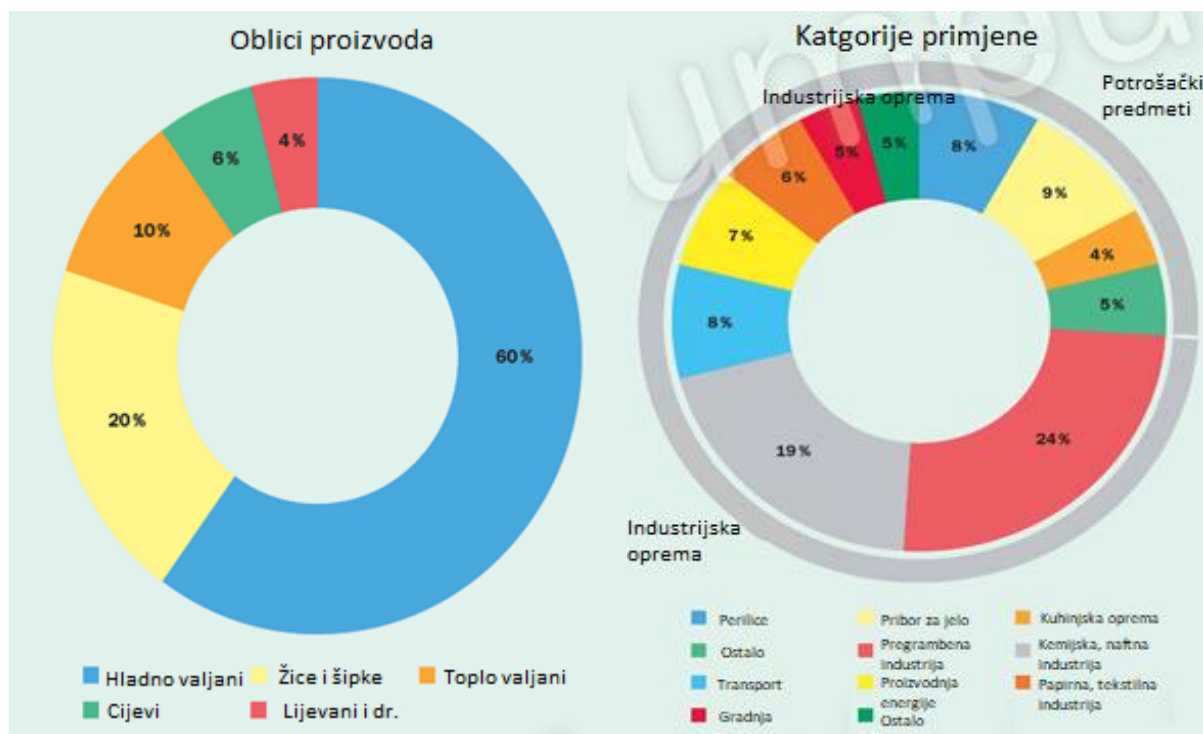
Eksperimentalni dio rada sastoji se od automatiziranog zavarivanja cijevi iz nehrđajućeg čelika u dva slučaja (s čistim argonom kao zaštitnim plinom i s mješavinom 95 % argona i 5 % vodika), vizualne kontrole, analize makroizbruska te ispitivanja otpornosti na rupičastu koroziju i usporedbe dobivenih rezultata ispitivanja.

2. PODJELA I PRIMJENA NEHRĐAJUĆIH ČELIKA U ZAVARENIM KONSTRUKCIJAMA

2.1. O nehrđajućim čelicima

Naziv nehrđajući čelik (*eng. stainless steel*) koristi se još od početka 20. stoljeća kada ga je patentirao njemački proizvođač čelika Krupp te se zadržao sve do danas. Koriste se prvenstveno zbog svoje korozijske postojanosti za specifične primjene i okoliš. Karakterizira ih minimalni udio kroma od 10,5 % te dodatak drugih legirajućih elemenata poput molibdena, titana, nikla, bakra, dušika, ugljika itd. kojima se modificira njihova struktura, poboljšava obradivost, čvrstoća ili žilavost na nižim temperaturama i korozijska postojanost.

Na našem se području zbog utjecaja brodogradnje ustalila upotreba oznaka za nehrđajuće čelike prema američkom standardu AISI (*eng. American Iron and Steel Institute*). Osim navedenog primjenjuju se također i standardi HRN i DIN.



Slika 1. Primjena nehrđajućih čelika u industriji podijeljena u kategorije [1]

Nehrđajući čelici imaju široku primjenu. Na slici 1. dan je pregled korištenja nehrđajućih čelika u svijetu kroz podjelu na proizvode (dijagram lijevo) i industrijsku primjenu (dijagram desno). Nehrđajući čelici koriste se u industriji nafte i plina, celuloze i papira, za cijevi

izmjenjivača topline u rafinerijama, kemijskoj i procesnoj industriji, medicini kao implantati, prehrambenoj industriji itd. Na slici 2. prikazana je ukupna svjetska proizvodnja nehrđajućih čelika u tonama kroz period 1970. – 2010. godine iz kojeg se jasno vidi da je proizvodnja u konstantnom porastu. Najkorišteniji su austenitni nehrđajući čelici koji zauzimaju prvo mjesto po ukupnoj proizvodnji i po broju različitih vrsta. Većina ih je razvijena iz čelika 18-8 (18 % Cr i 8-10 % Ni) dodavanjem legiranih elemenata i modificiranjem sastava.



Slika 2. Svjetska proizvodnja nehrđajućih čelika [1]

Korozijsku postojanost, odnosno sposobnost materijala da se suprotstavi korozijskoj agresiji medija (okoline), većim ili manjim usporenjem njegova djelovanja nehrđajući čelici duguju prisutnosti pasivnog oksidnog kromova filma na njihovoj površini. Film bogat kromom na njihovoj površini nastaje prirodnim, spontanom procesom oksidacije u medijima koji sadrže dostatnu količinu kisika i vrlo dobro prijanja uz površinu nehrđajućih čelika. Debljine je od 1 do 5 nanometara te je oku nevidljiv. Mogućnost samoobnavljanja prikazana na slici 3. omogućava mu da se čak i u slučaju mehaničkih oštećenja ili strojne obrade samostalno obnovi u sredinama s dovoljno kisika.



Slika 3. Mehanizam samoobnavljanja pasivnog filma [2]

Međutim, mogućnost samoobnavljanja ne znači da su nehrđajući čelici „neuništivi“. U određenim uvjetima pasivno stanje koje jamči korozijsku postojanost može se razoriti, što uzrokuje pojavu korozijskih procesa, najčešće u obliku usko lokaliziranih korozijskih fenomena.[2]

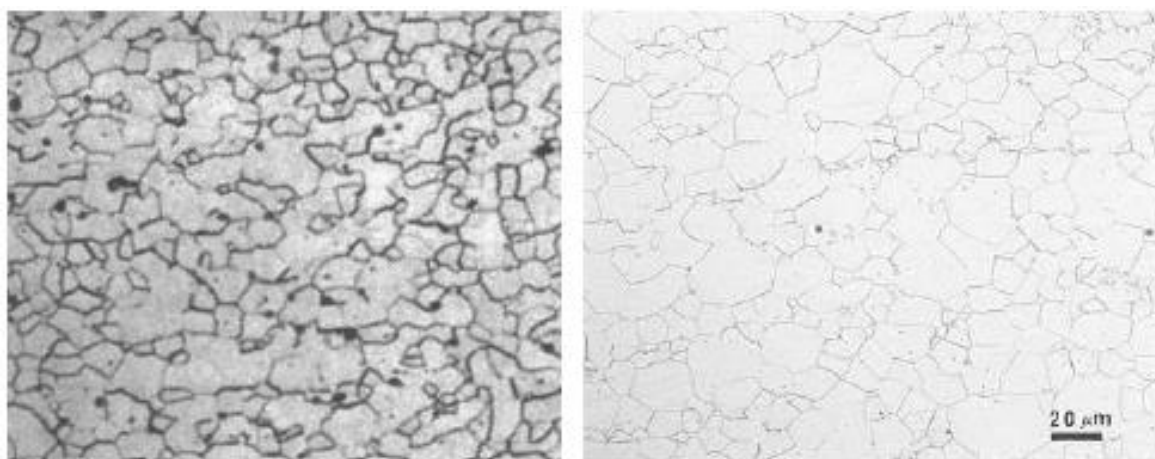
Zavareni spojevi od nehrđajućeg čelika mogu na konstrukciji predstavljati ozbiljnu opasnost zbog mogućih korozijskih oštećenja izazvanih najčešće rupičastom korozijom ali, i drugim oblicima korozije poput korozije u procjepu, napetosne korozije, mikrobiološke korozije, interkristalne korozije itd. Da bi se spriječilo korozijsko djelovanje važan je pažljiv i pravilan odabir nehrđajućeg čelika za pojedinu specifičnu namjenu i eksploatacijske uvjete kojima će konstrukcija biti izložena. Uz pravilan odabir važno je i provesti ispravan tehnološki postupak zavarivanja (postupak, parametri, dodatni materijal, itd.), jer zavareni spojevi na konstrukcijama od nehrđajućih čelika mjesta su izraženih strukturnih i površinskih nehomogenosti te predstavljaju idealno mjesto za pokretanje korozijskih procesa. [2]

Danas uglavnom koristimo podjelu nehrđajućih čelika u četiri osnovne grupe prema njihovoj mikrostrukturi. Tako poznajemo:

1. feritne nehrđajuće čelike
2. martenzitne nehrđajuće čelike
3. austenitne nehrđajuće čelike
4. dupleks (austenitno – feritne) nehrđajuće čelike

2.1.1. Feritni nehrđajući čelici

Feritni nehrđajući čelici uobičajeno sadrže 11 – 17 % kroma (Cr), manje od 0,1 % ugljika (C) te druge legirne elemente poput aluminija, titana, molibdena, niobija, silicija itd. U svrhu poboljšanja strojne obrade mogu se dodati sumpor i selen, a udio austenitizirajućih elemenata (C, N i Ni) je malen. Feromagnetični su i nemaju faznu pretvorbu zbog čega se ne mogu očvrstnuti postupcima toplinske obrade. Slika 4 daje prikaz mikrostrukture feritnih nehrđajućih čelika. [2]



Slika 4. Mehanizam samoobnavljanja pasivnog filma [2]

Granica razvlačenja kreće se u rasponu od 275 do 350 N/mm², vlačna čvrstoća od 415 do 585 N/mm², a duktilnost u rasponu od 20 do 35 %. Obradivost i upotrebu ograničava im slaba čvrstoća i osjetljivost na senzibilizaciju. U usporedbi s austenitnim nehrđajućim čelicima imaju slabiju čvrstoću na povišenim temperaturama. Prednosti su ove skupine čelika otpornost na koroziju i oksidaciju uz relativno nisku cijenu. Koriste se u uvjetima izloženosti dušičnoj kiselini, u obradi voda, preradi hrane i arhitekturi. Primjenjuju se također i u postrojenjima u kojima postoji opasnost od pojave napetosne korozije, gdje austenitni čelici ne mogu zadovoljiti. [2]

Porastom čistoće feritnih čelika postižu se znatna poboljšanja svojstava, odnosno dobivanjem vrlo niskih udjela nečistoća i primjesa pomoću suvremenih metoda rafinacije, a nazivaju se ELA čelici (*eng. Extra Low Additions*) ili superferitni čelici. Imaju bolju zavarljivost, žilavost pri niskim temperaturama, poboljšanu korozijsku postojanost, povišen udio kroma i vrlo niski udjel dušika i ugljika. [4]

Zavarljivost feritnih nehrđajućih čelika ograničena je zbog izrazite sklonosti prema pogrubljenju strukture, što može dovesti do ubrzanog izlučivanja krhkih intermetalnih faza kao što je sigma faza u području visokotemperaturnog dijela zone utjecaja topline. Na slici 5. prikazan je karakterističan problem kod zavarivanja feritnih nehrđajućih čelika. Kod tzv. superferitnih čelika dobiva se nešto bolja zavarljivost i bolja korozijska postojanost. Osim većeg udjela kroma (19 – 30 %), legiranja molibdenom, superferitni čelici imaju vrlo niski udjel ugljika i dušika ($< 0,01 - 0,02$ %). [2]

Kod zavarivanja feritnih čelika ($C < 0,12$ %) preporuča se predgrijavanje na $200 - 300^{\circ}\text{C}$ i održavanje navedene međuslojne temperature. U području zavarenog spoja zbog pada žilavosti preporuča se primjena odgovarajućeg austenitnog dodatnog materijala kojim se na određen način nadomješta duktilnost te poboljšava korozijska postojanost. [5]



Slika 5. Prikaz karakterističnih problema kod zavarivanja feritnih nehrđajućih čelika

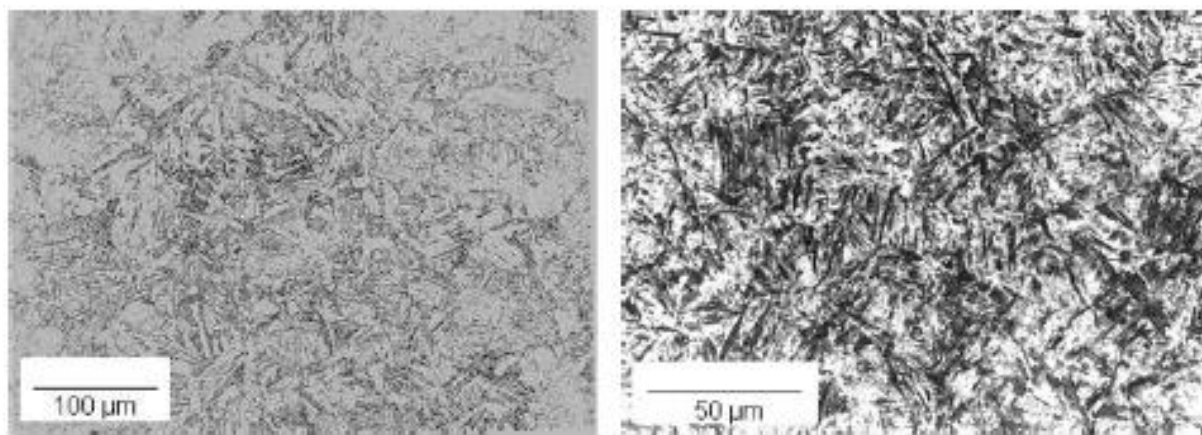
Svojstva feritnih nehrđajućih čelika su [5]:

- magnetičnost,
- slaba deformabilnost,
- relativno slabo zavarljivi zbog sklonosti pogrubljenja zrna grijanjem iznad 900°C ,
- skloni pojavi „krhkosti 475“ pri duljoj izloženosti temperaturi u rasponu $350 - 520^{\circ}\text{C}$,
- relativno su mekani,
- skloni lomu pri niskim temperaturama,
- ekonomski prihvatljiviji od ostalih nehrđajućih čelika,
- dobra obradivost odvajanjem čestica,

- loša postojanost u kloridnim otopinama poput morske vode,
- postojanost prema oksidirajućim kiselinama,
- dodatkom molibdena povećava im se otpornost od rupičaste korozije,
- nisu osjetljivi na pojavu napetosne korozije čak i u kloridnim otopinama i
- skloni stvaranju krhke sigma faze ($520 - 850^{\circ}\text{C}$).

2.1.2. Martenzitni nehrđajući čelici

Martenzitni nehrđajući čelici sadrže 11 – 13 % kroma (Cr) i do 1,2 % ugljika (C) te su najmanja skupina nehrđajućih čelika. U odnosu na ostale vrste nehrđajućih čelika moraju imati povišen udio ugljika kako bi se kaljenjem mogla povećati čvrstoća i tvrdoća. Mogu očvrnuti postupcima toplinske obrade te su feromagnetični. Sumpor i selen dodaju se kako bi se poboljšala obradivost, a za poboljšanje korozijske postojanosti dodaju se male količine nikla. Na slici 6. prikazana je mikrostruktura martenzitnog nehrđajućeg čelika. [1][2]



Slika 6. Mikrostruktura martenzitnog nehrđajućeg čelika [1]

Osjetljivost prema vodikovoj krhkosti, posebno u sulfidnim okolišima, njihov je najveći nedostatak uz lošu otpornosti na udarni rad loma kod sniženih temperatura. Zbog visokog sadržaja ugljika koji osigurava otpornost na trošenje te otpornost na koroziju koriste se za izradu elemenata kugličnih ležajeva, oštrica noževa, kirurškog i zubarskog alata, turbinskih lopatica, dijelova za rad na visokim temperaturama kao što su cijevi generatora pare. [2]

Zbog male toplinske vodljivosti ove je čelike potrebno ugrijavati na temperaturu austenitizacije i gasiti u ulju ili vakuumu zbog opasnosti od oksidacije. Što su veći udjeli ugljika i kroma, bit će potrebna i veća temperatura austenitizacije kako bi se otopilo što više ugljika i kroma u austenitu zbog zakaljivosti i korozijske postojanosti.

Za izradu zavarenih konstrukcija od martenzitnih čelika koriste se materijali s manje od 0,15 % ugljika, jer u području ZUT-a kod čelika s više od 0,15 % ugljika, otvrdnjavanje i zaostale napetosti dovode do nastanka pukotina.

Zavarivanje martenzitnih nehrđajućih čelika zahtijeva toplinske postupke prije i poslije postupka zavarivanja u obliku predgrijavanja na 200 -300°C i popuštanja na temperaturi od 700 – 750°C zbog svojstava zakaljivosti na zraku. Od dodatnih materijala koriste se dodatni materijali, isti ili slični osnovnom materijalu ili austenitni dodatni materijali. Na slici 7. prikazan je karakteristični problem pri zavarivanju martenzitnih nehrđajućih čelika uzrokovan korozijskim djelovanjem. [2]



Slika 7. Prikaz karakterističnih problema kod zavarivanja martenzitnih nehrđajućih čelika [2]

U području izvođenja zavara temperatura se ne smije spustiti ispod temperature martenzitne pretvorbe. Kako bi se postigla žilavija struktura prijelazne zone i većim dijelom izbjegle napetosti, zavareni radni komad treba odžariti nakon zavarivanja.

Pri TIG zavarivanju martenzitnih nehrđajućih čelika i u kombinaciji s drugim tipovima nehrđajućih čelika mogu se koristiti dodatni materijali od austenitnih čelika (AISI 308, 309, 310) kako bi se dobio metal zavara veće čvrstoće. Prije upotrebe raznorodnih dodatnih materijala u proizvodnji potrebno je dobro razmotriti opcije zbog razlike u mehaničkim svojstvima metala zavara, ZUT-a, osnovnog materijala kao i mogućih nuspojava nakon toplinske obrade. [6]

Možemo ih podijeliti u dvije podskupine [7]:

1. konstrukcijski čelici (korozijski postojani, poboljšavaju se, sadrže do 0,25 % ugljika)
2. alatni čelici (nakon kaljenja nisko se popuštaju, otporni na abrazijsko trošenje, > 0,3 % ugljika)

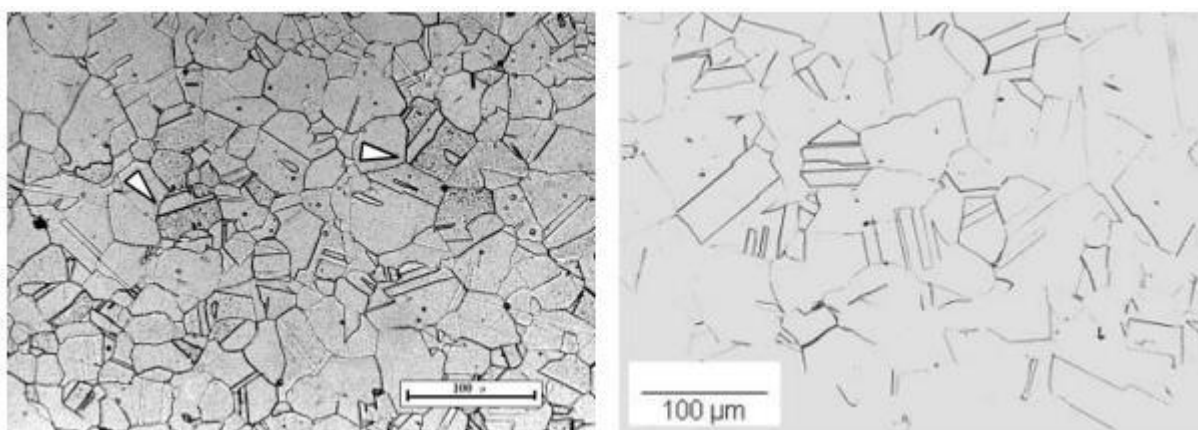
Svojstva martenzitnih nehrđajućih čelika [8]:

- loša otpornost na udarni lom kod sniženih temperatura,
- osjetljivost prema vodikovoj krhkosti, posebno u sulfidnim okolišima,
- mogu se kaliti,
- najčešće se koriste u poboljšanom stanju,
- imaju poboljšanu granicu razvlačenja i otpor puzanju pri povišenim temperaturama i
- u odnosu na feritne i austenitne nehrđajuće čelike imaju višu tvrdoću, čvrstoću i otpornost na trošenje.

Smanjenjem sadržaja ugljika ispod 0,10 % nastaju tzv. mekomartenzitni nehrđajući čelici koji se svrstavaju u visokolegirane čelike. Sniženje čvrstoće i granice razvlačenja u tom slučaju nadomješta se legiranjem kromom (13 – 18 %), niklom (1 – 6 %) i molibdenom (< 3 %). Primjenjuju se za proizvodnju dijelova strojeva i aparata izloženih nečistom zraku, lopatica turbina, valjaka u proizvodnji papira, dijelova pumpi itd.

2.1.3. Austenitni nehrđajući čelici

Austenitni nehrđajući čelici najveća su i najkorištenija skupina nehrđajućih čelika. Primjenjuju se u različitim područjima, od arhitekture, nosivih konstrukcija, medicinske opreme i kuhinjskog pribora. Zbog svoje dobre korozijske postojanosti, obradivosti, izvrsne zavarljivosti, mehanička svojstva i estetskih karakteristika, najčešće su korištena vrsta nehrđajućih čelika. Osnovni je austenitni čelik UNS S30400 (AISI 304) ili 18-8, legura na osnovi željeza, te sadrži 18 % kroma, 8,5 % nikla i manje količine ugljika, dušika, mangan i silicija. Od njega je razvijeno desetak novih legura dodavanjem npr. dušika ili molibdena radi bolje otpornosti na koroziju. Na slici 8. prikazana je mikrostruktura austenitnog čelika. [2]



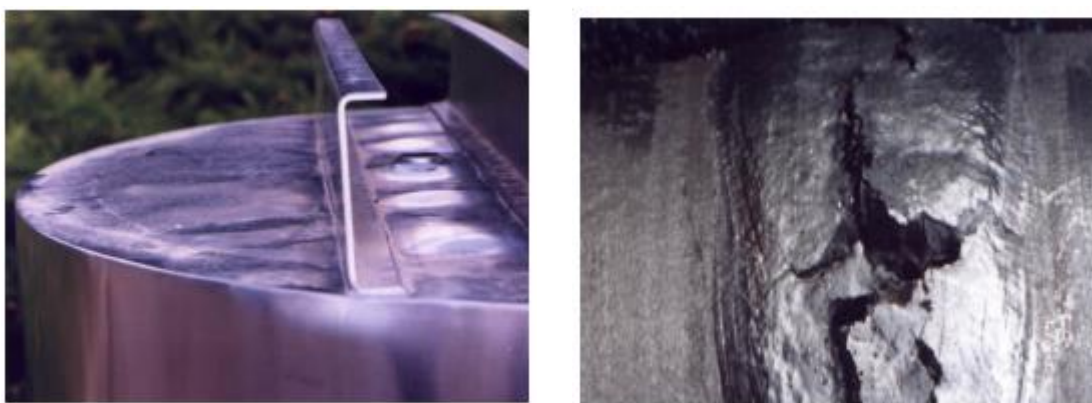
Slika 8. Mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika [1]

Maksimalna temperatura primjene austenitnih čelika je oko 760°C, do koje ne dolazi do smanjenja čvrstoće i otpornosti na oksidaciju, iznimno do 1000°C kod čelika s visokim udjelom legiranih elemenata (uz krom, visok udio ima silicij, aluminij ili ugljik). Mogu se značajno očvrstnuti hladnom deformacijom, a primjenjuju se u uvjetima kad se traži dobra postojanost na atmosfersku koroziju i koroziju na povišenoj temperaturi. Zbog visokog udjela legiranih elemenata skuplji su od npr. martenzitnih i feritnih (s nižim i srednjim udjelom kroma) nehrđajućih čelika, međutim njihova svojstva poput dobre oblikovljivosti i zavarljivosti opravdavaju njihov odabir. [1]

Zavarljivost austenitnih čelika dobra je uz iznimku čelika koji sadrže sumpor ili selen-čelika za strojnu obradu te ih nije potrebno predgrijavati prije zavarivanja. Problem predstavlja mogućnost precipitacije kromovih karbida u temperaturnom rasponu od 425 do 850°C, što može dovesti do interkristalne korozije (slika 9 desno). Prilikom zavarivanja treba voditi računa o povećanoj sklonosti deformacijama (slika 9 lijevo). Zbog visokog koeficijenta

toplinske istežljivosti te niskog koeficijenta toplinske vodljivosti, podložniji su deformacijama uslijed zavarivanja. Ovaj se problem danas rješava pravilnim odabirom dodatnog materijala, tehnikom te ostalim uvjetima zavarivanja. [1]

Snižavanjem sadržaja ugljika ispod 0,03 % može se spriječiti pojava interkristalne korozije zbog manje mogućnosti stvaranja Cr-karbida. Prema normi AISI takvi se čelici označavaju tako da se uz brojčanu oznaku dodaje slovni dodatak: L, LC ili ELC (*eng. Low Carbon* ili *Extra Low Carbon*). Glavni je nedostatak ove skupine čelika sniženje čvrstoće i granice razvlačenja zbog manjeg udjela ugljika, dok je pozitivna strana otpornost na senzibilizaciju, odnosno interkristalnu koroziju.



Slika 9. Prikaz karakterističnih problema kod zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika [9]

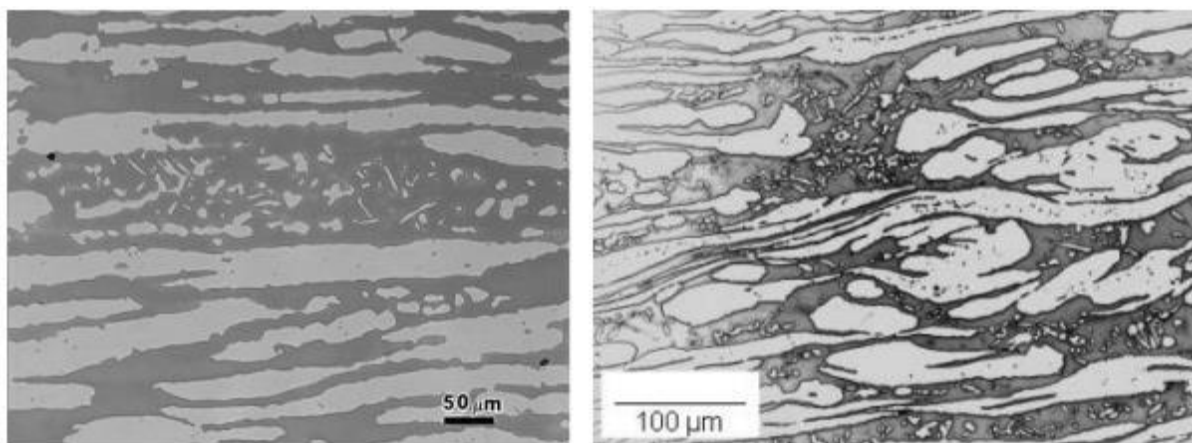
Svojstva austenitnih nehrđajućih čelika su [8][9]:

- visok odnos čvrstoća/masa,
- dobra svojstva pri niskim temperaturama,
- nisu skloni povećanju kristalnog zrna u zoni utjecaja topline tijekom zavarivanja,
- nemagnetičnost,
- veće su napetosti i deformacije tijekom zavarivanja nego kod feritnih čelika,
- nema mogućnosti usitnjavanja zrna,
- odlična plastičnost, nisko naprezanje tečenja ($185 - 225 \text{ N/mm}^2$),
- visoka otpornost na rupičastu koroziju, napetosnu i interkristalnu koroziju (podložna na smanjenje u ZUT-u zbog visokih temperatura),
- kubična plošno centrirana kristalna rešetka (FCC) koja osigurava visoku deformabilnost
- visoka žilavost, oksidacija i korozijska otpornost,
- postojana austenitna struktura od „solidus“ temperature do ispod sobne temperature

- specifični električni otpor koji utječe na neke tehnološke zahtjeve kao što su jakost struje zavarivanja, slobodna kraj žice itd. je povećan,
- koef. toplinske vodljivosti je oko 60 % manji što uzrokuje slabijim odvođenjem topline iz područja zavarivanja,
- koef. toplinskog rastezanja je oko 50 % veći u odnosu na ostale čelike što utječe na pojavu deformacija i zaostalih naprezanja tijekom i nakon zavarivanja i
- dodavanjem kroma više od 18% povećava korozijsku postojanost.

2.1.4. Dupleks (austenitno – feritni) nehrđajući čelici

Dupleks čelici imaju dvofaznu austenitno – feritnu mikrostrukturu s 40 – 60 % ferita. Razvijeni su 1930. godine, ali zbog problema pri zavarivanju, korozijskom postojanošću i krhkošću počinju se koristiti tek 80-ih godina 20. stoljeća, kada su navedeni problemi riješeni dodavanjem dušika, nakon čega počinje nagli razvoj i primjena duplex čelika. Kombiniranjem prednosti feritne i austenitne mikrostrukture duplex čelici ostvaruju dobra mehanička i korozijska svojstva, zbog čega se primjenjuju na mnogim mjestima. Zbog visokog udjela ferita imaju višu toplinsku vodljivosti i nižu toplinsku rastezljivost te su feromagnetični. Bolji su izbor od austenitnih čelika u slučajevima gdje se traži visoka otpornost na napetosnu i rupičastu koroziju. Na slici 10. prikazana je mikrostruktura duplex nehrđajućih čelika.



Slika 10. Mikrostruktura austenitno – feritnog (dupleks) nehrđajućeg čelika [3]

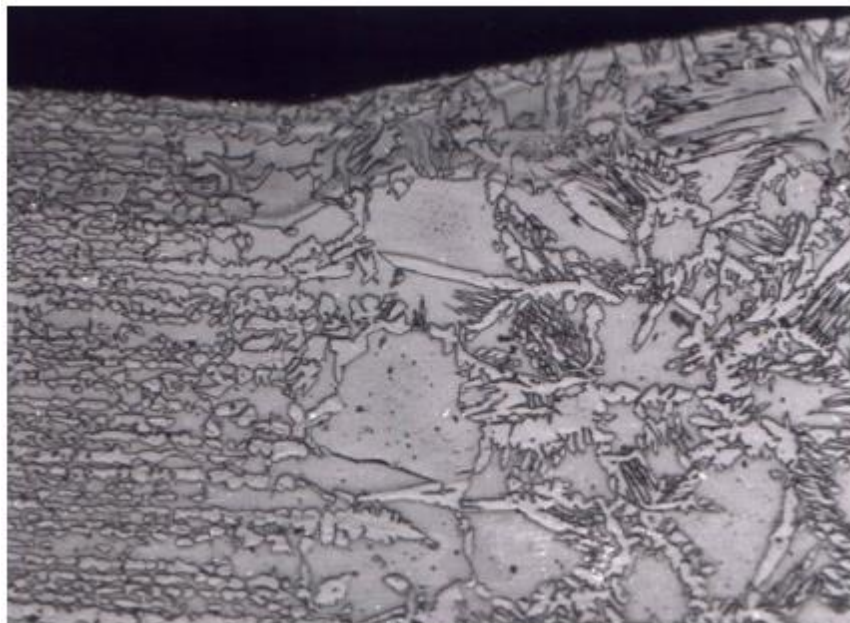
Moguće ih je podijeliti u tri generacije. Glavna je razlika između prve i druge generacije u tome što druga generacija sadrži namjerno dodani dušik (0,10 – 0,25 %), dok je obilježje treće generacije $PREN > 40$. PREN, tj. djelotvorna suma koja se često uzima u obzir prilikom procjene otpornost rupičastoj koroziji računa se prema izrazu [10]:

$$PREN = \% Cr + 3,30 * (\% Mo) + 30 * (\% N)$$

Dupleks oznaka danas se najčešće upotrebljava za čelike koji sadrže 22 % kroma, superdupleks za čelike sa sadržajem kroma od 25 %. Primjena im je široka: industrija nafte i plina (ventili, cjevovodi, pumpe, crpke), petrokemijska industrija (apsorberi, separatori, izmjenjivači topline), brodogradnja (osovine brodskog vijka, kormila, grijači, ležajevi), posude pod tlakom, cisterne, izmjenjivači topline, industrija papira, kemijsko – procesna industrija (proizvodnja kiselina, rad s otopinama, sapnice) itd.

Kako bi se zadržao dovoljan udio austenitne strukture u području zavarenog spoja koriste se dodatni materijali predviđeni za zavarivanje dupleks čelika, koji su legirani s nekoliko postotaka nikla u odnosu na dodatni materijal. Utvrđen je pozitivan utjecaj na stvaranje austenitne strukture ukoliko se u zaštitni plin dodaje dušik. Feritizacija, posljedica zavarivanja, djeluje štetno jer povećava udio feritne strukture (i preko 80 %), što dovodi do stvaranja krhkih struktura u tom pojasu, smanjenja korozijske postojanosti itd. Upravo je feritizirani dio strukture najkritičniji dio zavarenog spoja od dupleks čelika. Stoga je zavarivanje nužno izvoditi u kontroliranim uvjetima (unos topline, parametri zavarivanja). Na slici 11 prikazan je karakteristični problem pri zavarivanju austenitno – feritnih (dupleks) nehrđajućih čelika uzrokovan promjenom mikrostrukture. [2]

Izlučeni karbidi kroma koji nastaju po granicama ferita i austenita mogu se učinkovito ukloniti žarenjem na 870 – 950°C. Zbog izbjegavanja nastanka sigma faze i „krhkosti 475“, nakon postupka žarenja potrebno je provesti hlađenje na zraku ili u ulju.



Slika 11. Prikaz karakterističnih problema kod zavarivanja austenitno – feritnih (dupleks) nehrđajućih čelika austenitno – feritnog (dupleks) nehrđajućeg čelika [2]

Svojstva austenitno – feritnih (dupleks) nehrđajućih čelika [2]:

- povećana otpornost napetosnoj koroziji i utjecaju klorida,
- intermetalna sigma – faza može nastati u austenitu i feritu,
- bolja otpornost na opću i rupičastu koroziju u odnosu na austenitne nehrđajuće čelike,
- čvrstoća im je veća u odnosu na austenitne nehrđajuće čelike,
- što je viši udio ferita postojanost prema interkristalnoj koroziji je veća,
- teže se stvaraju karbidi Cr_{23}C_6 ,
- primjena na povišenim temperaturama je moguća do maksimalno 350°C zbog pojave „krhkosti 475“ koja se javlja u dupleks čelicima u feritnoj fazi (kao i kod feritnih nehrđajućih čelika),
- temperatura primjene u rasponu od -50 do 350°C i
- magnetični su.

3. RUČNO I AUTOMATIZIRANO TIG ZAVARIVANJE

3.1. Općenito o TIG postupku zavarivanja

Naziv TIG postupaka zavarivanja skraćenica je na engleskom jeziku koja znači Tungsten Inert Gas. Uz ovaj naziv koristi se još i skraćenica GTAW (Gas Tungst Arc Welding) te u njemačkoj stručnoj literaturi WIG (Wolfram Inert Gas schweissen). Ovaj je postupak zavarivanja elektrolučni i pri njemu se električni luk uspostavlja i održava između netaljive elektrode izrađene od volframa (ili volframovih legura) i osnovnog materijala. [1]

Ovaj postupak zavarivanja razvijen je za potrebe zavarivanja legura lakih metala u zrakoplovnoj industriji, a kasnije se njegova primjena proširila prema kemijskim i procesnoj industriji gdje se zavaruju aluminij, bakar i njegove legure te nehrđajući čelici. Tijekom procesa zavarivanja, zagrijana zona, rastaljeni osnovni materijal i dodatni materijal štite se od štetnog djelovanja okolne atmosfere tako da se inertni (neaktivni) plinovi upuhuju kroz keramičku sapnicu koaksijalno smještenu oko netaljive elektrode. Za zaštitni inertni plin najčešće se koriste argon (Ar), helij (He) i rjeđe mješavina argona i helija.

Specifičnost kod TIG postupka zavarivanja je to da se prijenos kapljice metala ne odvija kroz električni luk, nego se dodatni materijal dodaje u prednji rub taline gdje se potom tali pod električnim lukom i spaja s talinom zavara. [11]

S obzirom da je ovaj postupak zavarivanja najčešće ručni postupak zavarivanja, kvaliteta zavara uvelike ovisi o vještini operatera – zavarivača. Međutim, s napretkom tehnologije u zadnje vrijeme sve se više ide prema poluautomatizaciji i potpunoj automatizaciji (robotizaciji) procesa. Pri ručnom postupku zavarivač pomiče pištolj i u prednji rub taline u pravilnim vremenskim intervalima dodaje dodatni materijal. Kod poluautomatiziranog postupka jedina razlika u usporedbi s ručnim je u tome što se dodatni materijal dodaje iz dodavača žice uz pomoć elektromotora. U serijskoj proizvodnji primjenjuje se automatizirani TIG postupak. Na robotsku ruku koja je numerički programirana postavlja se pištolj poluautomata i upravljana pomoću CAD/CAM sučelja sa upravljačkog računala. Nadzor i mijenjanje parametara tijekom samog procesa može se obavljati preko upravljačkog računala tijekom samog procesa. [12]

Upotreba TIG zavarivanja danas je puno raširenija nego što je bila u njegovim zaćecima, pa se tako danas koristi pri zavarivanju aluminija i Al-legura, magnezija i Mg-legura, titana i Ti-legura, Cu-legura, nehrđajućih ćelika, nelegiranih i niskolegiranih ćelika, itd. S obzirom da su inertni plinovi argon i helij skupi, ovaj postupak koristi se najćešće u zavarivanju navedenih metala koji se teže zavaruju drugim postupcima. [11] Slika 12. prikazuje postupak izvođenja rućnog TIG zavarivanja.



Slika 12. Rućno TIG zavarivanje [13]

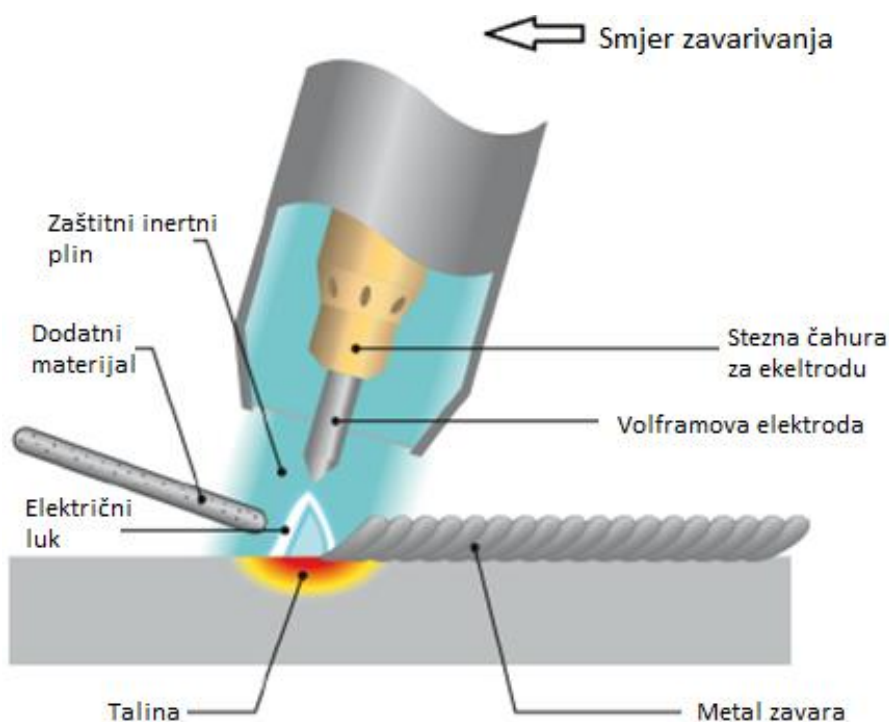
Prednosti TIG zavarivanja [11]:

- zavarivanje kompliciranih oblika,
- zavarivanje u svim poloćajima rada,
- zavarivanje raznolikih metala i metalnih legura,
- ne javlja se troska pri zavarivanju,
- nema dima ni štetnih plinova pri zavarivanju,
- ne dolazi do nepoćelnog rasprskavanja kapljica metala izvan eklektićnog luka,
- ispravno izvedeni, zavareni spojevi TIG postupkom spadaju u najkvalitetnije zavarene spojeve,
- nakon TIG postupka zavar je gladak, lijep i ćist i
- zbog integriranog vodenog hlađenja pištolja moguć je dugotrajan rad.

Nedostaci TIG zavarivanja [11]:

- veliki zahtjevi za točnost,
- skupi zaštitni inertni plinovi,
- otežan rad na otvorenom,
- neekonomičnost u zavarivanju materijala iznad 6 mm debljine,
- skupa, dugotrajna obuka zavarivača za TIG postupak i
- potreba za jako dobrom pripremom spoja za zavarivanje (očišćen od ugorina, metalnih oksida na površini, premaza, odmašćen i očišćen od bilo kakvih vidljivih nečistoća na površini koja se zavaruje).

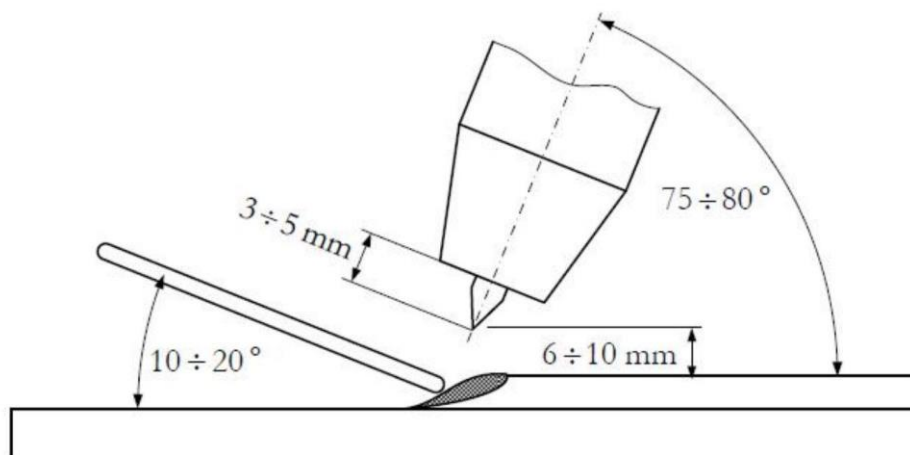
3.2. Princip rada TIG zavarivanja



Slika 13. Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [14]

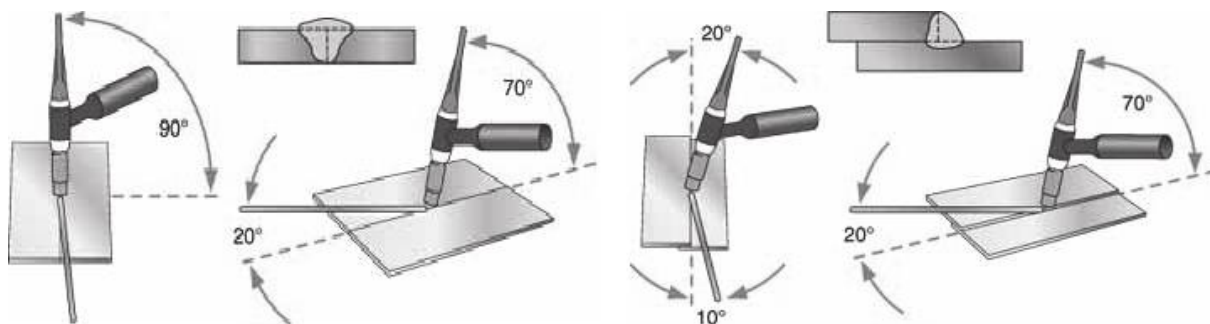
Pritiskom prekidača na pištolju za zavarivanje ili nožnog prekidača započinje postupak ručnog TIG zavarivanja. U tom trenutku započinje cirkulacija rashladnog sredstva te kroz sapnicu počinje istjecati zaštitni plin. Pištolj se mora primaknuti mjestu zavarivanja na točno određeni razmak (2 – 5 mm). U tom trenutku upravljačka elektronika šalje visokofrekventnu struju koja u inertnom plinu lako ionizira takvu atmosferu te omogućava jednostavnu

uspostavu električnog luka. U točno određenim vremenskim intervalima zavarivač dodaje dodatni materijal koji se tali u prednjem rubu taline osnovnog materijala te se zajedno s osnovnim materijalom spaja u metal zavora, kako je prikazano na slici 13. Dodatni materijal kod nekih slučajeva nije potrebno dodavati, već se osnovni materijal tali i tvori metal zavora. Za vrijeme postupka, zavarivač pomiče pištolj i dodaje dodatni materijal određenom brzinom ovisno o kvaliteti pripreme samog spoja i uz određenu tehniku rada. Nakon puštanja prekidača pištolja prekida se električni luk, a zaštitni plin nastavlja istjecati još određeno vrijeme kako bi zaštitio talinu od naglog hlađenja i vrh elektrode, zbog čega pištolj i dalje mora ostati nad radnim komadom. Prekidanje električnog luka najpovoljnije je postupnim gašenjem kako se u završnom krateru ne bi stvarala udubljenja popraćena sitnim pukotinama. Ukoliko ne postoji mogućnost postepenog gašenja, prekidanje električnog luka moguće je izvesti smanjenjem struje zavarivanja i laganim malim pokretom pištolja unazad na već skrućeni i vrući dio zavora gdje se prekida električni luk.

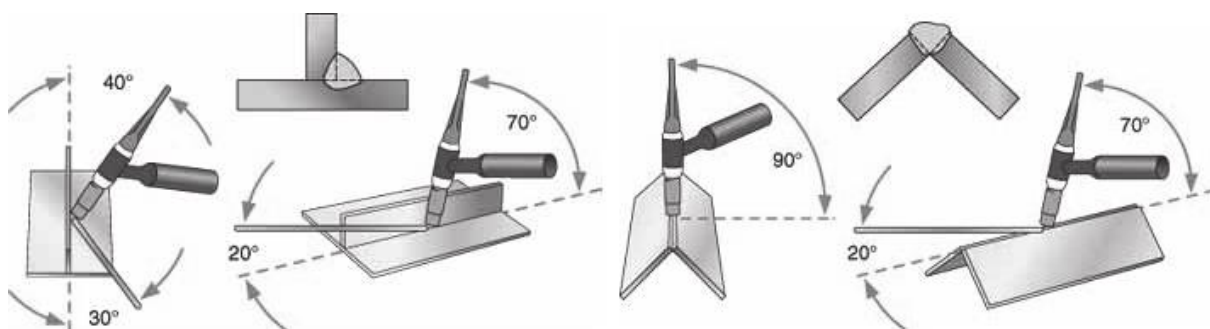


Slika 14. Položaj elektrode i dodatnog materijala u odnosu na radni komad [11]

Na slici 14. može se vidjeti točno definirani, pravilan položaj elektrode i dodatnog materijala. Prikazana je lijeva tehnika zavarivanja koju karakterizira to što je pištolj u desnoj ruci, dodatni materijal u lijevoj te je smjer zavarivanja s desna na lijevo. Za optimalno zavarivanje kut pištolja treba biti od 75° do 80°, a dodatni se materijal mora dodavati pod kutom od 10° do 20°. Vrh volframove elektrode istaknut je iznad keramičke sapnice 3 – 5 mm, a propisani razmak između vrha elektrode i radnog komada je 6 do 10 mm. Na slikama 15. i 16. prikazane su tehnike izvođenja TIG zavarivanja. [11]



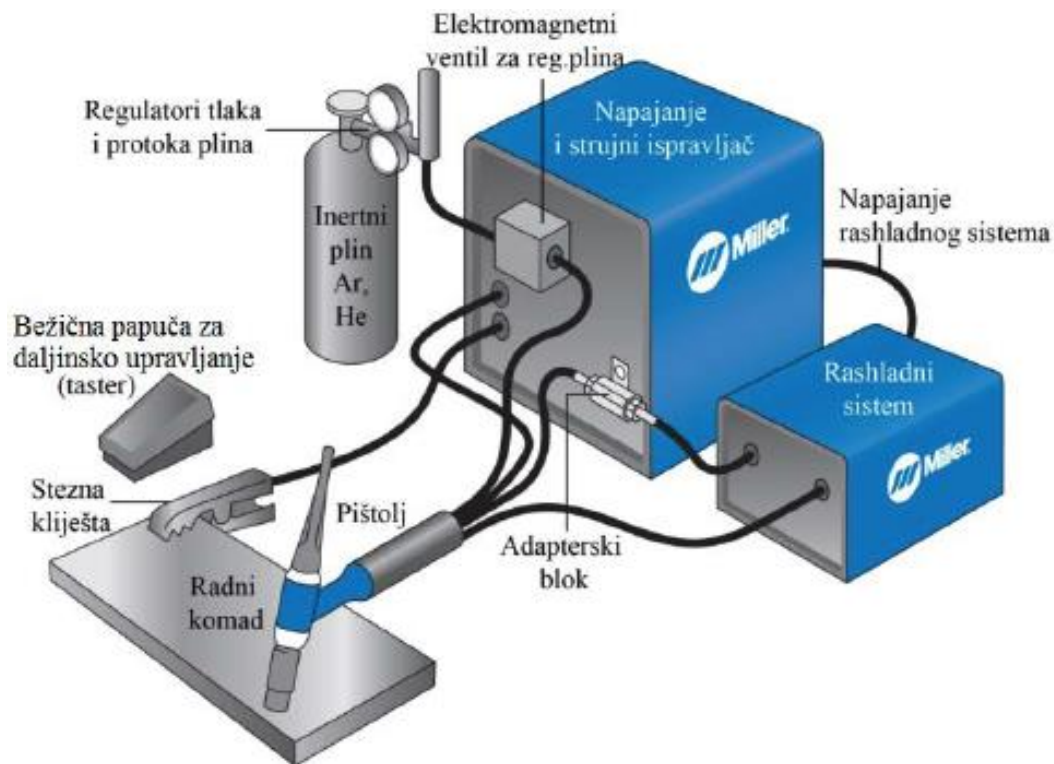
Slika 15. Izvođenje sučeonog (lijevo) i preklopnog (desno) spoja [15]



Slika 16. Izvođenje kutnog (lijevo) i rubnog (desno) spoja [15]

3.3. Oprema za TIG zavarivanje

Na slici 17. prikazani su osnovni dijelovi uređaja za postupke TIG zavarivanja. Kontrolni ormarić u kojem se nalazi transformatorsko napajanje, strujni ispravljač, upravljačka elektronika i sistem za rashlađivanje pištolja priključen je na mrežu. Potrebno je pripaziti na koji se pol (- / + / AC) spaja volframova elektroda (pištolj), a to ovisi o materijalu koji se zavaruje. Uz pomoć steznih kliješta drugi se kraj spaja na radni komad kako bi se zatvorio strujni krug. Visokofrekventni modul paralelno je spojen između radnog komada i pištolja za zavarivanje koji omogućava lakše uspostavljanje električnog luka te štiti zavarivača od strujnog udara. U atestiranoj čeličnoj boci kojoj je na vrhu smješten reducir ventil nalazi se zaštitni plin. Na reducir ventil nadovezuju se mjerni instrumenti te regulator protoka i tlaka. Zaštitni plin izlazi iz sapnice pištolja i štiti područje zvara i elektrodu od okolnih plinova iz atmosfere.

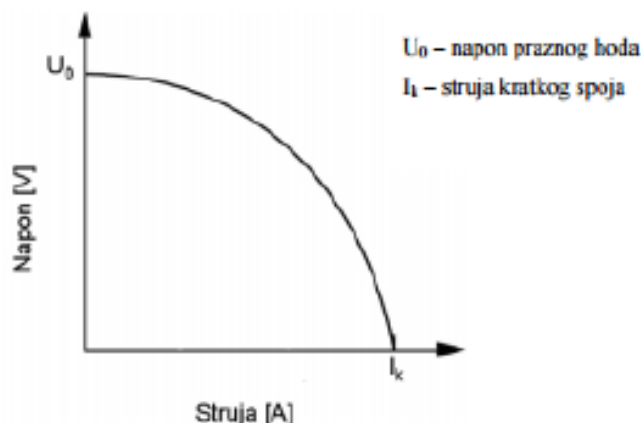


Slika 17. Dijelovi uređaja za TIG zavarivanje [16]

Sustav hlađenja pištolja danas je integriran u većinu modernih uređaja pomoću tekućine za hlađenje. Pomoću polikabla svi su uređaji spojeni s pištoljem te se preko njega provodi kontrola procesa. [17]

3.3.1. Izvor struje

Od izvora struje za TIG zavarivanje koriste se istosmjerni, izmjenični i kombinirani izvori struje. Kako bi se osigurala približno konstantna struja zavarivanja, neovisno o promjeni dužine luka uslijed pomicanja ruke kod ručnog TIG zavarivanja, izvor treba imati strmo padajuću karakteristiku (slika 18.). Kod mehaniziranog TIG postupka zavarivanja koriste se izvori struje s ravnom karakteristikom jer je dužina luka konstantna.



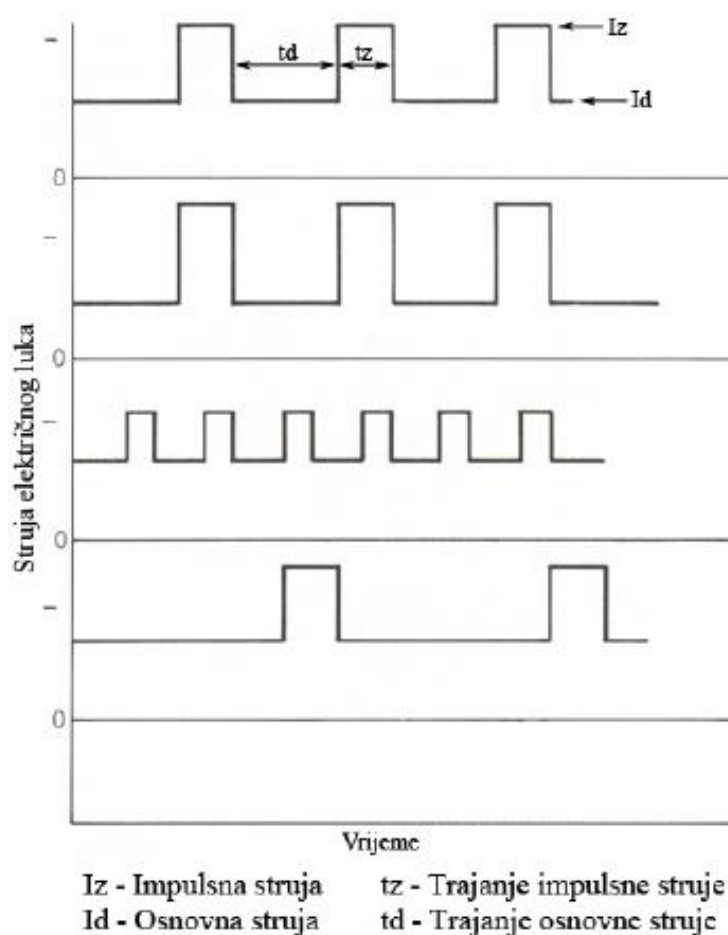
Slika 18. Strmo padajuća karakteristika izvora struje za TIG zavarivanje [18]

Uspostavljanje električnog luka kod TIG postupka zavarivanja bez dodira elektrode i radnog komada postiže se pomoću izvora struje koji su opremljeni visokonaponskim, visokofrekventnim modulom. Proizvodi se električna struja visokog napona te se ugrađuje na izvore izmjenične i istosmjerne struje zavarivanja. Zbog visoke frekvencije struje 20 – 50 kHz život zavarivača nije ugrožen. Korištenje kratkog spoja volframove elektrode i radnog komada za uspostavljanje električnog luka izbjegava se kod TIG zavarivanja. Postoji mogućnost oštećenja vrha volframove elektrode, što smanjuje stabilnost električnog luka te volfram ulazi u osnovni materijal, što negativno utječe na mehanička svojstva spoja. [19]

Za aparaturu TIG zavarivanja uglavnom se grade posebni izvori struje zavarivanja koji mogu biti kombinirani. Građeni su tako da se koriste kao ispravljači i kao transformatori, što se ostvaruje prebacivanjem sklopke na izvoru. Današnji suvremeni izvori imaju karakteristike s kojima je moguće obavljati i impulsno TIG zavarivanje.

Zavarivanje kojemu se jakost električne struje ritmički mijenja u dvije faze nazivamo impulsnim TIG zavarivanjem. Koristi se za potrebe zavarivanja tankih limova, osjetljivih materijala i u prisilnim položajima. Građeni su tako da se mogu programski podesiti na mijenjanje jakosti struje u određenim vremenskim intervalima tijekom zavarivanja. U određenom vremenskom razdoblju (t_z) čija je dužina podesiva, prolazi električna struja veće jakosti (I_z) s kojom se tali i protaljuje. Nakon toga slijedi struja manje jakosti (I_d), u određenom vremenskom razdoblju (t_d), koja dozvoljava skrućivanje pretaljenog mjesta, ali ne i hlađenje. Na taj se način ponavlja zavarivanje jačom pa slabijom električnom strujom, u određenim intervalima, a zavareni spoj izgleda kao da je sastavljen od niza točaka

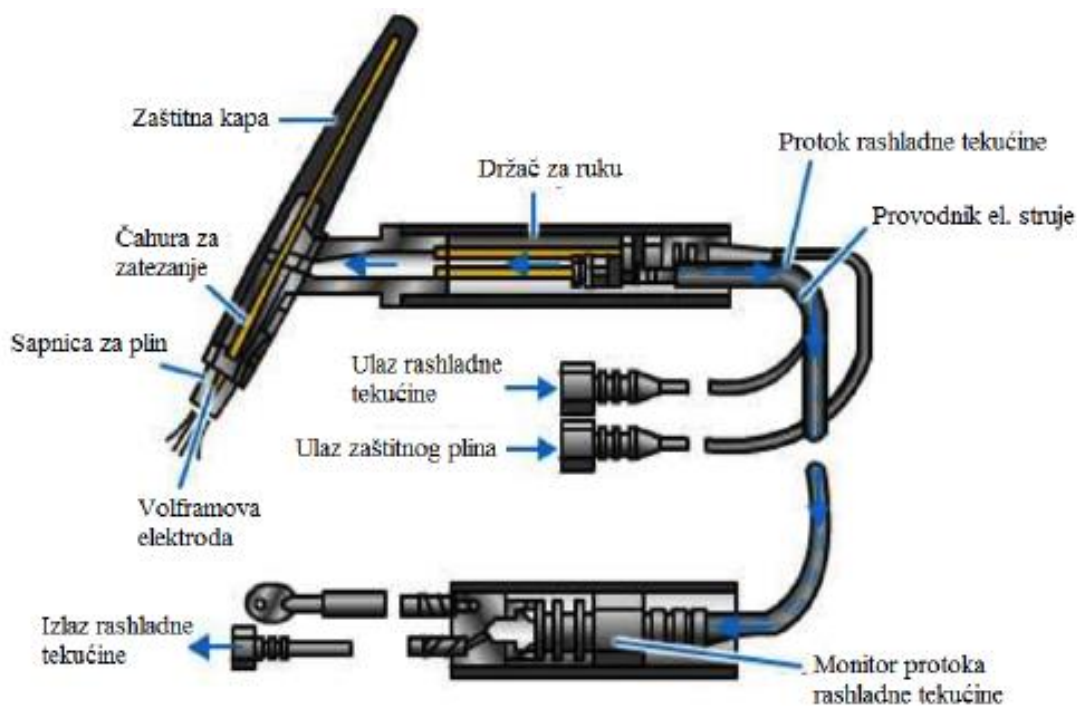
protaljivanja koje se preklapaju jedna preko druge. Na slici 19. prikazane su neke osnovne karakteristike različitih pravokutnih impulsnih oblika.



Slika 19. Osnovne karakteristike različitih pravokutnih impulsnih oblika [20]

3.3.2. Pištolj za zavarivanje i sapnica

Ovisno o načinu hlađenja i dizajnu, pištolji za zavarivanje mogu se podijeliti u dvije osnovne grupe. Prema dizajnu dijele se na ručne i na pištolje za robotizirano zavarivanje koji umjesto dijela za držanje imaju dio za montažu na robota. Prema načinu hlađenja pištolje za zavarivanje dijelimo na one s hlađenjem rashladnim medijem (struje velike jakosti) i one bez hlađenja (struje jakosti do 200 A i kraća vremenska opterećenja). Oblici pištolja mogu biti različiti, ovisno o potrebama zavarivača. Kod zavarivanja na teško pristupačnim mjestima izrađuju se pištolji posebnih oblika i dimenzija. Klasični pištolj za zavarivanje prikazan je na slici 20., a sastoji se od držača za ruku, čahure za stezanje elektrode, sapnice za plin, volframove elektrode, zaštitne kape na volframovoj elektrodi i priključaka na tijelu pištolja (za zaštitni plin, dovod i odvod sredstava za hlađenje i izvor električne struje). Taster (prekidač) nalazi se na držaču za ukapčanje električnih komandi, a na sam pištolj spojen je snop provodnika dužine 5 - 8 m koji je priključen na komandni ormarić ili na izvor struje zavarivanja. [12]



Slika 20. Presjek pištolja za TIG zavarivanje sa sustavom hlađenja [12]

Za usmjeravanje protoka zaštitnog plina služi sapnica koja može biti različitih oblika i veličina, različitog materijala, ovisno o jakosti struje na mjestu zavarivanja. Sapnice se izrađuju od keramike, metala i kvarcnog stakla. Najjeftinija, a samim time i najkorištenija je keramička sapnica, ali je vrlo krhka te lako može puknuti. Najbolja je za korištenje kod visokofrekventnih struja. Prema obliku najčešće su korištene vrste sapnica konusnog, cilindričnog ili profiliranog oblika. Veličina sapnice određena je prema pravilu po kojemu unutarnji promjer sapnice mora biti tri puta veći od promjera volframove elektrode. Količina i kvaliteta protoka zaštitnog plina ovisit će o obliku i veličini sapnice. Na slici 21. prikazana je ovisnost protoka plina o obliku sapnice. Gornja konusno sužena sapnica uzrokuje turbulentno strujanje plina, a kod donje ravne sapnice izraženo je fokusirano laminarno strujanje. [12]



Slika 21. Stabilan i nestabilan protok zaštitnog plina [13]

3.3.3. Netaljiva volframova elektroda

Izrađuje se od čistog volframa ili volframa s dodacima torijevog oksida (ThO_2), cirkonijskog oksida (ZrO_2), lantanovog oksida (La_2O_3) ili cerijevog oksida (CeO_2). Volframova elektroda provodnik je električne struje s pištolja na radni komad. Električni luk koji tali metal osnovnog i dodatnog materijala nastaje između volframove elektrode i radnog komada, pri čemu se elektroda ne tali. Kod zavarivanja uz zaštitni plin ne dolazi do taljenja volframove elektrode, kojoj je talište na visokih 3422°C .

Izrađuju se u standardnim promjerima od: 0.5, 1.0, 1.6, 2.4, 3.2, 4.0, 6.4 i 8.0 mm te u standardnim dužinama od: 50, 75, 150, 175, 200 mm. Označavaju se prema sastavu materijala elektrode u slovnoj, brojčanoj i oznaci u boji. U tablici 1. dan je prikaz označavanja tipova elektroda.

Tablica 1. Označavanje volframovih elektroda [11]

Oznaka (ISO)	Dodatak oksida (%)	Vrsta oksida	Oznaka bojom
W	---	---	Zelena
WC 20	1,8 – 2,2	CeO_2	Siva
WL 10	0,9 – 1,2	La_2O_3	Crna
WL 15	1,4 – 1,6	La_2O_3	Zlatna
WL 20	1,9 – 2,1	La_2O_3	Plava
WZ 4	0,3 – 0,5	ZrO_2	Smeđa
WZ 8	0,7 – 0,9	ZrO_2	Bijela
WT 10	0,8 – 1,2	ThO_2	Žuta
WT 20	1,7 – 2,2	ThO_2	Crvena
WT 30	2,8 – 3,2	ThO_2	Ljubičasta
WT 40	3,8 – 4,2	ThO_2	Narančasta

Volframove elektrode (W) koriste se za zavarivanje izmjeničnom električnom strujom, dok se ostale elektrode koriste za rad s istosmjernom i izmjeničnom strujom zavarivanja.

Elektrode legirane torijevim oksidom (ThO_2) omogućavaju puno lakše uspostavljanje električnog luka, mogu raditi na puno većim strujama tijekom procesa i imaju odličnu stabilnost električnog luka tijekom zavarivanja. Blago su radioaktivne (blago emitiranje α – čestica) te ih odlikuje niža granica minimalnog opterećenja i imaju duži radni vijek.

Elektrode legirane cirkonijevim oksidom (ZrO_2) omogućuju jednostavno uspostavljanje električnog luka, imaju odlična svojstva pri zavarivanju izmjeničnom strujom jer pridržavaju zaobljeni vrh elektrode tijekom zavarivanja i sprječavaju kontaminaciju zavara.

Elektrode legirane lantanovim oksidom (La_2O_3) imaju slična svojstva kao torirane elektrode. Karakterizira ih jednostavno uspostavljanje električnog luka, stabilnost električnog luka, dugi životni vijek i rad s jakim strujama. Moguća su zamjena za torirane volframove elektrode.

Elektrode legirane cerijevim oksidom (CeO_2) također imaju slična svojstva kao torirane volframove elektrode. Karakterizira ih jednostavnije uspostavljanje električnog luka, dobra stabilnost električnog luka i dug životni vijek. Mana im je što ne mogu raditi s jakim strujama kao lantanove elektrode. Moguća su zamjena za torirane volframove elektrode. [11]

Produljenje radnog vijeka elektrode moguće je postići pravilnim opterećenjem same elektrode te će se ujedno i smanjiti onečišćenja zavarenog spoja volframom. Jakost struje zavarivanja u odnosu na promjer volframove elektrode računa se prema formuli: [11]

$$I = 100 \cdot d \cdot k \text{ [A]}$$

gdje je d promjer elektrode u mm, k je koeficijent opterećenja elektrode (različit za svaku vrstu elektrode), a njegove su vrijednosti prikazane u tablici 2.

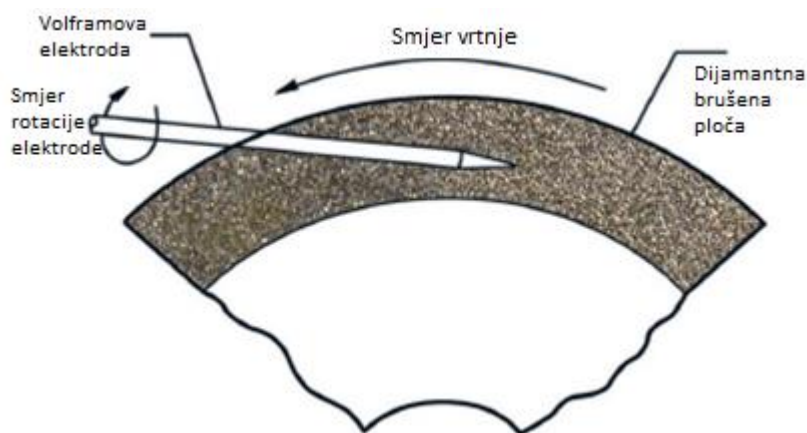
Tablica 2. Vrijednosti koeficijenata opterećenja elektroda za razne vrste volframovih elektroda [11]

Vrsta elektrode:	W	WT 10	WT 20	WT 30	WT 40, WZ 8, WL 10
k_{\min}	0,45	0,40	0,35	0,30	0,50
k_{\max}	0,55	0,65	0,75	0,80	1,00

Na oštrom vrhu volframove elektrode, kod pravilnog opterećenja, formira se mala kapljica taline volframa u obliku kuglice kroz koju se održava stabilan električni luk. Kod elektrode zaobljenog vrha to nije slučaj. Preopterećena elektroda brže se troši te onečišćuje zavar volframom, a premalo opterećena elektroda daje nestabilan električni luk.

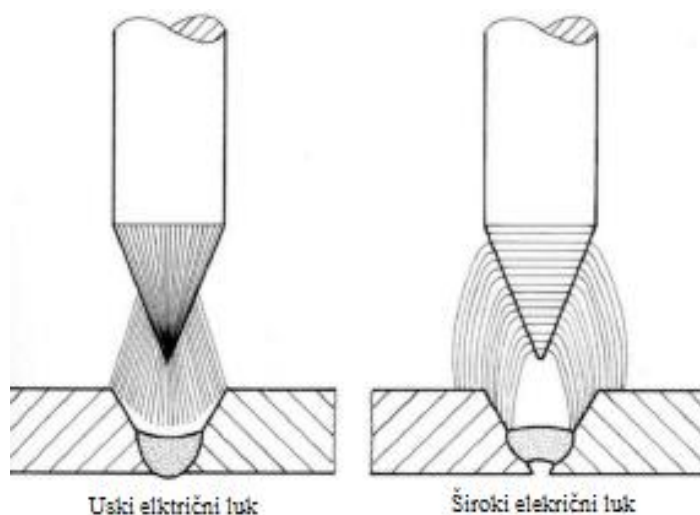
Kod zavarivanja aluminija, magnezija i njihovih legura vrh elektrode treba zaobliti te se u pravilu odabire čista volframova elektroda. Kada se zavaruju ostali metali u pravilu se koristi torirana elektroda i vrh elektrode potrebno je zašiljiti pod određenim kutom.

Kada je potrebno izbrusiti elektrodu pod određenim kutom, preporuča se korištenje najfinijih brusnih ploča te naknadno poliranje prethodno nabrušenih površina. Poželjno je također da se brusna ploča koja se koristi za brušenje volframovih elektroda ne koristi i za brušenje drugih materijala, kako ne bi došlo do kontaminacije. [22]



Slika 22. Brušenje volframove elektrode [23]

Stabilan električni luk dobit će se pravilnim brušenjem elektroda (prikazano na slici 22.). Način brušenja elektroda bitno utječe na vrstu električnog luka. U slučaju nepravilno nabrušene elektrode dobit će se široki električni luk prikazan na slici 23.



Slika 23. Vrsta električnog luka ovisno o brušenju volframovih elektroda [21]

3.3.4. Rashladni sustav i sustav za dovod plina

Rashladna sredstva koja se koriste za hlađenje pištolja su voda (destilirana) i/ili antifriz te razne primjese antikorozivnih dodataka. Rashladni sustav može biti u tri verzije: otvoreni, zatvoreni centralni i zatvoreni pojedinačni, a ugrađen je u sklop aparature za TIG zavarivanje. Direktan priključak na vodovod karakterizira otvoreni rashladni sustav, zatvoreni centralni sustav se sastoji od velikog spremnika za vodu i crpke koja služi za pogon vode po dijelovima aparature, dok zatvoreni pojedinačni sustav sastoji se od malog spremnika, hladnjaka, elektromotora i crpke. [21]

Sustav za dovod zaštitnog plina služi za dovod plina do mjesta zavarivanja u točno određenom protoku, a sastoji se od [21]:

- čelične boce (prikazane na slici 24.) ili spremnika plina,
- redukcijskog ventila s mjerачem protoka plina,
- crijeva za dovod plina s magnetskog ventila na pištolj,
- magnetskog ventila (uključivanje/isključivanje protoka plina na pištolju) i
- crijeva za dovod plina s pištolja.



Slika 24. Boce zaštitnog plina [16]

3.4. Vrste TIG zavarivanja prema stupnju automatizacija

Povećanje konkurentnosti, širok asortiman proizvoda na tržištu i ekonomičnost zahtijevaju uvođenje fleksibilne proizvodnje čime bi se trebalo omogućiti smanjenje troškova, povećanje produktivnosti i visoke razine kvalitete. Zbog nedostataka ručnog TIG zavarivanja koje se želi izbjeći, automatizirani i poluautomatizirani TIG postupci postaju pravilo u specijaliziranim i velikoserijskim proizvodnjama. Dva su moguća rješenja: automatizacija ili robotizacija zavarivanja. Odabir jedne od dviju opcija ovisi o raznim faktorima, poput vrste proizvodnje (maloserijska ili velikoserijska proizvodnja). Slika 25. prikazuje primjer robotiziranog i automatiziranog zavarivanja.



Slika 25. Primjer robotiziranog (desno) i automatiziranog (lijevo) zavarivanja [37]

3.4.1. Ručno TIG zavarivanje

Iz izvora struje, priključenog na električnu mrežu dolazi električna struja, jednim kabelom u pištolj za zavarivanje, a drugim na radni komad. Pritiskom prekidača koji se nalazi na pištolju počinje protjecati zaštitni plin i sredstvo za hlađenje. Zaštitni plin dovodi se do mjesta zavarivanja preko gumenog crijeva do mjesta zavarivanja preko sapnice u pištolju. Zavarivač u jednoj ruci drži pištolj, a u drugoj dodatni materijal koji povremeno dodaje u prednji rub taline osnovnog materijala koji se zajedno s talinom osnovnog materijala skrućuje u zavareni spoj. Približavanjem pištolja radnom komadu na razmak od 2 do 5 mm uspostavlja se električni luk koji tali osnovni materijal. Glavni je nedostatak ove metode u tome što kvaliteta zavara ovisi o vještini zavarivača i vrijeme za izobrazbu dobrog zavarivača je dugo, a samim time i skupo.

3.4.2. Poluautomatizirano TIG zavarivanje

Poluautomatizirani sustav TIG zavarivanja po principu rada isti je kao i ručni, s tim da se pritiskom na prekidač na pištolju uključuje još i elektromotorni sustav za dovod dodatnog materijala. Brzina gibanja žice koja dolazi pod električni luk, gdje se tali zajedno s osnovnim materijalom, može se regulirati. Slika 26. prikazuje pištolj za poluautomatizirano TIG zavarivanje koji je u principu sličan osnovnoj izvedbi kao kod ručnog zavarivanja, uz razliku što kod poluautomatiziranog zavarivanja ima dodatni uređaj pričvršćen na prednjoj strani i služi za dodavanje dodatnog materijala. Uz uređaj na pištolju, za kompletan sustav dovoda žice potrebni su još i crijevo za dovod žice te kolut za žicu s mehanizmom dodavanja žice.



Slika 26. Pištolj za poluautomatizirano TIG zavarivanje [24]

3.4.3. Automatizirano TIG zavarivanje

Automatizacija TIG postupka zavarivanja moguća je i bez robota. Automatizacijom postupka zavar je moguće izvesti bez ljudskog utjecaja, što pozitivno utječe na kvalitetu zavara (pogotovo kod velikih serija), ujednačavanje kvalitete te ubrzava samo zavarivanje i povećava produktivnost. Gledajući ekonomsko tehnološke parametre automatsko zavarivanje ima niz prednosti pred konvencionalnim ručnim tehnologijama, ali postoje i ograničenja koja treba uzeti u obzir pri projektiranju tehnologije zavarivanja. [25]

Prednosti automatiziranog TIG postupka [25]:

- veća količina nataljenog materijala u jedinici vremena,
- veća produktivnost,
- manji broj grešaka i popravaka,
- veća brzina zavarivanja,
- mogućnost zavarivanja svakog sloja u jednom prolazu,
- manje brušenja,
- veća iskoristivost dodatnog materijala i
- bolja kontrola unosa topline.

Nedostaci automatiziranog TIG postupka [25]:

- skupa i složena oprema,
- znatno veći zahtjevi za održavanje opreme,
- problemi s plinskom zaštitom kod rada na otvorenom zbog vjetra i lošeg vremena i
- za teško dostupne točke zavarivanja i dalje su neophodni zavarivači.

3.4.4. Automatizirano TIP TIG zavarivanje

Konvencionalni TIG postupak upitan je sa stanovišta produktivnosti i mogućnosti automatizacije. Primjena tehnoloških rješenja kod TIP TIG postupka omogućava povećanje produktivnosti i integraciju u automatizirane sustave.

TIP TIG zavarivanje modernizirana je varijanta TIG postupka zavarivanja uz primjenu automatskog dodavanja dodatnog materijala koje se sastoji od dvije komponente. Žica se primarno giba prema naprijed u smjeru zavora te se na to gibanje integrira sekundarno linearno gibanje koje proizvodi dodavač žice preko mehaničkog sustava. Površinske napetosti taline umanjuju se pod utjecajem kinetičke energije gibanja, što omogućuje bolje spajanje i miješanje osnovnog i dodatnog materijala, dok nečistoćama i plinovima omogućava izlaz iz rastaljenog metala. Kad se radi o varijanti s vrućom žicom, depozit materijala može biti i do 50% veći. Dinamički efekti gibanja žice osiguravaju stabilan i upravljiv zavarivački proces, a brzina žice i oscilatorno gibanje naprijed – nazad kontinuirano su podesivi i njima se može nezavisno upravljati. [25]

Primjenom ovog postupka moguće je vrlo efikasno zavariti konstrukcijske čelike, nehrđajuće čelike, aluminij i njegove legure, titan, itd. Neke od prednosti korištenja ovog postupka su [25]:

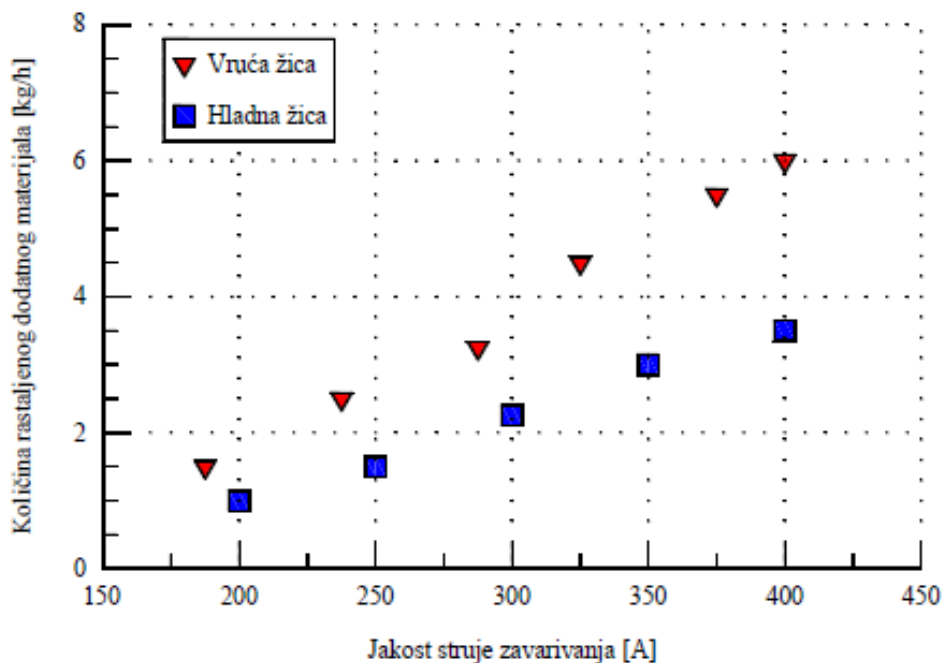
- znatno veći depozit u odnosu na klasični TIG,
- visoka kvaliteta zavora,
- dobar estetski izgled i geometrija zavora bez potreba za naknadnom obradom i
- smanjen unos topline u radni komad (smanjenje deformacija, manji utjecaj na mikrostrukturu).

Postoje dvije varijante TIP TIG zavarivanja [25]:

1. TIP TIG zavarivanje s hladnom žicom
2. TIP TIG zavarivanje s vrućom žicom

Glavna je razlika između ove dvije varijante u predgrijavanju žice tj. dodatnog materijala. Predgrijavanje se provodi efektom Joulesove topline, odnosno prolaskom električne struje (koju proizvodi dopunski izvor struje) kroz dodatni materijal, odnosno žicu. Ovim se postupkom povisuje temperatura dodatnom materijalu te je potrebna manja energija električnog luka. Najvažnija je prednost ovog postupka u odnosu na druge postupke zavarivanja s taljivom elektrodom mogućnost odvojenog upravljanja unosom energije i unosom dodatnog materijala u talinu zavora. [25]

Veći dio topline električnog luka kod TIG zavarivanja koristi se za taljenje osnovnog materijala. Dovođenjem prethodno zagrijanog dodatnog materijala potrebna je manja količina energije električnog luka nego kod varijante sa nezagrijanim dodatnim materijalom. Zbog toga je moguće koristiti niže parametre zavarivanja ili uz primjenu istih parametara zavarivanja postizati veće količine nataljenog dodatnog materijala. Slika 27. prikazuje usporedbu količine nataljenog dodatnog materijala korištenjem TIG zavarivanja s hladnim i vrućim dodatnim materijalom. [25]



Slika 27. Usporedba količine nataljenog materijala pri TIG zavarivanju s hladnom i vrućom žicom [25]

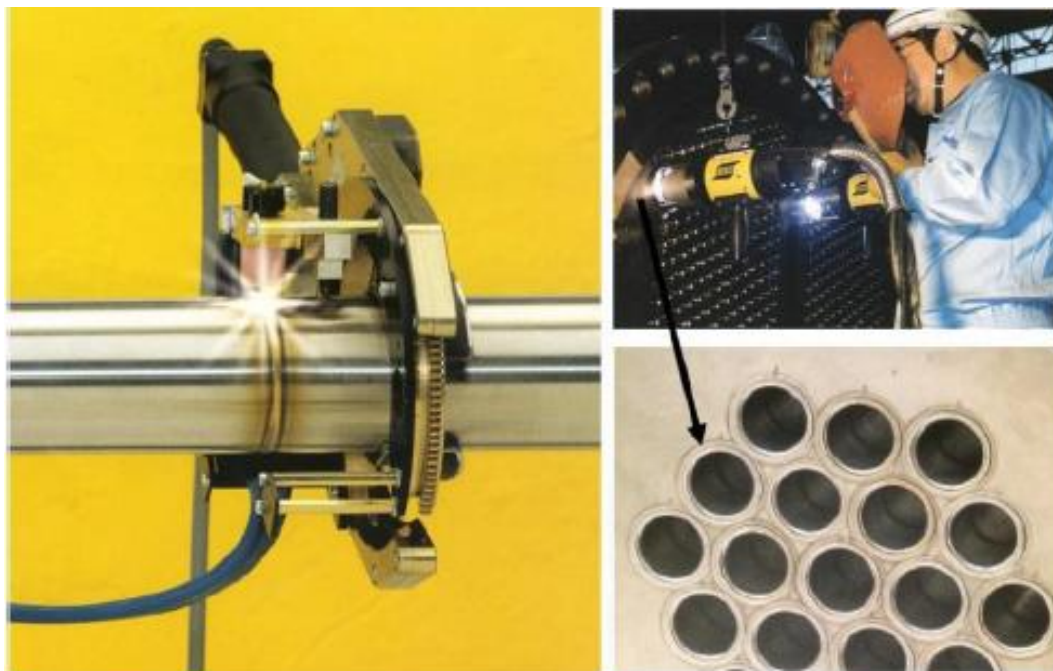
Upotrebom vruće žice može doći i do određenih problema koji dovode do nestabilnosti procesa. Najčešći problem koji se javlja skretanje je električnog luka prema vrućoj žici ili njegovo skretanje u smjeru suprotnom od vruće žice uslijed djelovanja elektromagnetskih sila između struje električnog luka i struje predgrijavanja žice. Ovaj fenomen naziva se magnetskim puhanjem električnog luka. Drugi najčešći problem koji se javlja problem je proboja električnog luka s volframove elektrode na dodatni materijal.

3.4.5. Automatizirani postupak orbitalnog zavarivanja cijevi

Razvojem orbitalnog TIG zavarivanja omogućeno je brže i kvalitetnije zavarivanje simetričnih radnih komada. Razvoj ove tehnologije započeo je prije više od četrdeset godina kao odgovor na sve veće standarde u zavarivanju cijevi. Danas se automatske glave za zavarivanje koriste u cijelom svijetu, a razvoj ove tehnologije bio je potaknut sve većim zahtjevima za kvalitetom zavarenih spojeva, manjkom kvalitetnih zavarivača, zbog čega je došlo do porasta cijene rada i probijanja vremenskih rokova za izvođenje projekta.

Orbitalna glava za zavarivanje obavlja rotaciju oko radnog komada. Sastoji se od fiksnog dijela koji služi za fiksiranje glave na radni komad i dijela koji rotira te na sebi nosi pištolj za zavarivanje. Na taj način pištolj opisuje kružnicu oko radnog komada. Postoji i druga mogućnost u kojoj se radni komad rotira oko svoje osi, dok pištolj miruje. U ovom slučaju

pištolj za zavarivanje može se postaviti u najpovoljniji položaj za postupak zavarivanja. Prednost je ovog sistema ostvarivanje većih brzina zavarivanja i konstantnosti, dok je glavna mana fleksibilnost primjene. Slika 28. prikazuje primjer orbitalnog zavarivanja. [26]



Slika 28. Primjer orbitalnog TIG zavarivanja [26]

Neka od područja primjene orbitalnog zavarivanja su: kemijska i naftna industrija, zrakoplovna i svemirska industrija, farmaceutska, prehrambena, nuklearna, poluvodička industrija, izgradnja cjevovoda, brodogradnja, itd. Zbog visoke cijene opreme, pristupačnosti spoju za zavarivanje, ovisnosti o vrsti i debljini materijala, pripremi spoja itd. mogućnosti su korištenja ovog postupka limitirane.

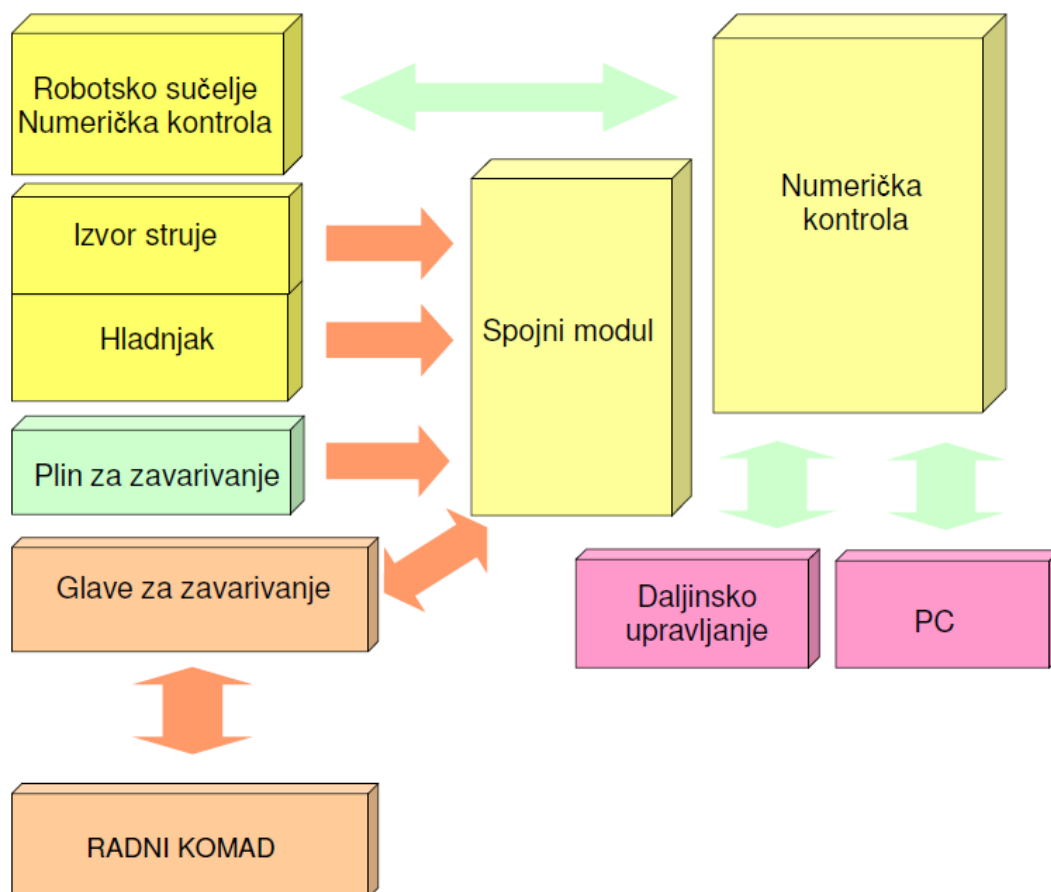
Postupci zavarivanja koji se koriste kod orbitalnog zavarivanja kao mehanizirani ili poluautomatizirani procesi su [26]:

1. TIG postupak zavarivanja s ili bez dodatnog materijala (hladna i vruća žica)
2. TIG postupak u uskom žlijebu (vruća žica)
3. MIG/MAG postupak zavarivanja
4. Plazma postupak zavarivanja (posebni slučajevi u HV položaju – zidni)

Orbitalni proces zavarivanja koristi su većinom u kombinaciji s TIG postupkom zavarivanja hladnom žicom ili bez dodatnog materijala zbog potrebe za dobrom kontrolom taline zavara. Potrebno je voditi računa o parametrima postupka te pravilnoj pripremi samog spoja.

Oprema za orbitalno zavarivanje sastoji se od izvora struje za zavarivanje i glave za orbitalno zavarivanje. Kontrola i upravljanje kretnjama glave za orbitalno zavarivanje zadaća su izbora struje za zavarivanje. Glave mogu biti različitih konstrukcijskih rješenja. [26]

Na slici 29. prikazan je shematski sustav za orbitalno TIG zavarivanje. Postupak je u pravilu u potpunosti automatiziran, zbog čega se uz osnovne dijelove za TIG zavarivanje nalaze i dijelovi za numeričku kontrolu. Procesom se u pravilu upravlja pomoću računala.



Slika 29. Shematski prikaz orbitalnog sustava za zavarivanje [26]

Od orbitalnih glava za zavarivanje postoje tri uobičajena tipa koja pokrivaju gotovo cijelo područje primjene orbitalnog zavarivanja. To su [26]:

1. zatvorene glave za zavarivanje
2. otvorene glave za zavarivanje
3. glave za zavarivanje u cijevnu stjenku

3.4.5.1. Zatvorene glave za zavarivanje

Zatvorene glave za zavarivanje (slika 30.) namijenjene su procesima zavarivanja u potpuno zatvorenom sistemu. Zatvoreni dio glave puni se prije zavarivanja zaštitnim plinom tako da je cijeli spoj tijekom procesa zavarivanja potpuno zaštićen od atmosferskog utjecaja. Ovakav tip glave za zavarivanje koristi se prvenstveno za zavarivanje nehrđajućih čelika i titana, ponajviše zbog zaštite zavarenog spoja (lica i korijena) od oksidacije. [26]

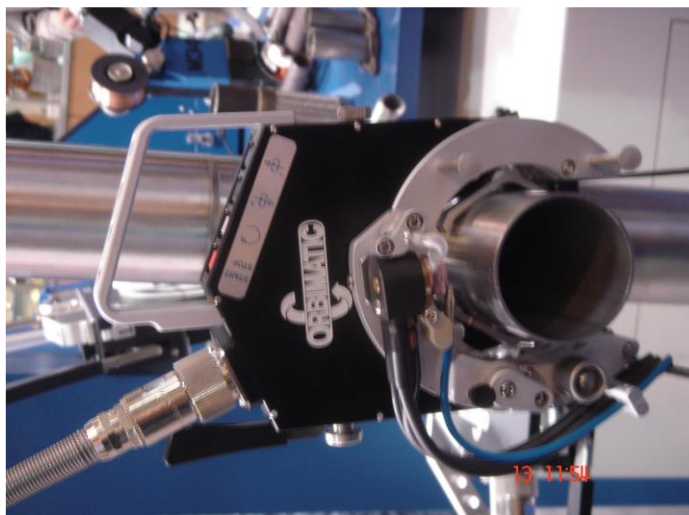


Slika 30. Primjer zatvorene glave za zavarivanje [42]

Primjenjuju se samo za postupke zavarivanja bez dodatnog materijala, zbog čega se koriste samo za debljine stjenki do 3 mm, iznimno do 4 mm te za vanjske promjere cijevi od cca 2 do 170 mm. [26]

3.4.5.2. Otvorene glave za zavarivanje

Otvorene glave za zavarivanje (slika 31.) najčešće se koriste za zavarivanje uz dodatni materijal, za debljine stjenki od 3 mm te za višeslojno zavarivanje. Udaljenost volframove elektrode od radnog komada održava se mehaničkim putem. Pištolj za zavarivanje može se zakrenuti za 35° - 45°, što omogućava zavarivanje kutnih zavarenih spojeva.



Slika 31. Primjer otvorene glave za zavarivanje s AVC kontrolorom [26]

Kod višeslojnog zavarivanja potrebno je ostvariti njihanje i automatsku kontrolu udaljenosti volframove elektrode od radnog komada. U ovakvom slučaju pištolj za zavarivanje mora biti montiran na motorizirani križni nosač koji je upravljan od strane izvora struje za zavarivanje. Udaljenost volframove elektrode od radnog komada mora se održavati elektronski, zbog čega mora postojati automatska kontrola napona zavarivanja (AVC). [26]

3.4.5.3. Glave za zavarivanje u cijevnu stijenku

Glave za zavarivanje u cijevne stjenke (slika 32.) koriste se za izradu izmjenjivača topline različitih izvedbi i namjena. Cijevne stjenke imaju i više stotina cijevi koje se moraju zavariti, što za zavarivače predstavlja veliki problem ukoliko se zavarivanje mora provesti ručno zbog veličine cijevi, malog razmaka između, itd. Jednolika kvaliteta i produktivnost u ovakvim je slučajevima puno veća kod automatiziranih postupaka. Glave mogu biti raznih izvedbi i namjena, kao što je zavarivanje cijevi unutar cijevne stjenke, s ili bez dodatnog materijala. [26]



Slika 32. Primjer glave za zavarivanje u cijevnu stjenku [26]

3.5. Parametri kod TIG zavarivanja

Priprema spoja i jakost struje za zavarivanje ovise o vrsti i debljini osnovnog materijala. Područje je jakosti struje zavarivanja od 40 do 400 A. Kod TIG postupka bitni su početak i prekid zavarivanja. Kada se uspostavi električni luk, početno se mjesto prije dodavanja žice dobro pretali. Suvremeni TIG uređaji imaju mogućnost postupnog smanjenja struje električnog luka. Kada se električni luk prekine, pištolj ostaje na mjestu završetka sve do prestanka strujanja zaštitnog plina (3 - 10 s). [15]

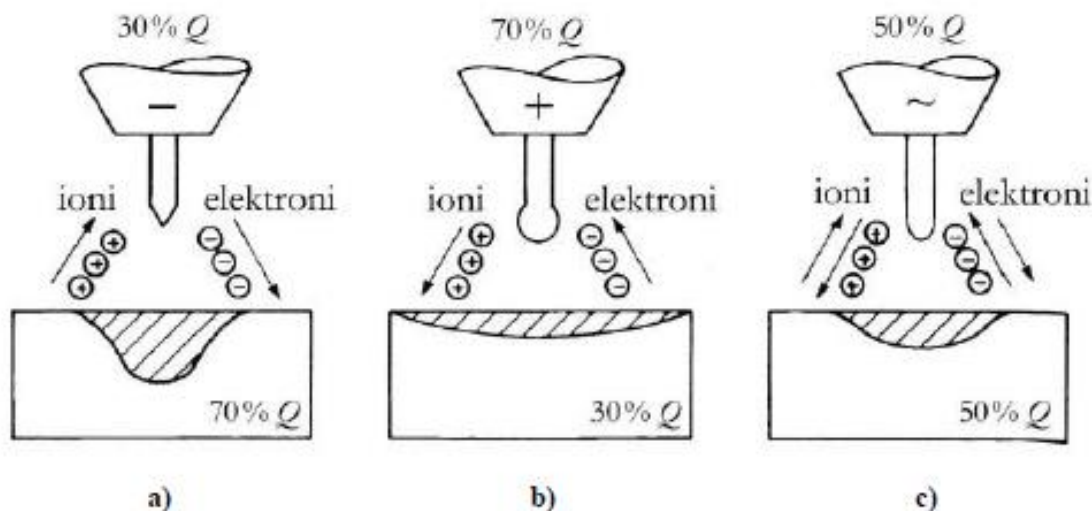
Posebnu pozornost treba obratiti na odabir parametara zavarivanja, jer oni uvelike određuju kakva će biti kvaliteta zavara nakon zavarivanja. Utjecajni faktori na kvalitetu zavara koji se mogu mijenjati i koji se odabiru pri TIG zavarivanju su:

1. jakost struje zavarivanja
2. polaritet elektrode
3. vrsta i promjer volframove elektrode
4. protok i vrsta zaštitnog plina
5. brzina zavarivanja
6. položaj pištolja i dodatnog materijala
7. dodavanje žice i gibanje pištolja (tehnika rada)

3.5.1. Jakost struje zavarivanja

Kod ručnog TIG zavarivanja nehrđajućih čelika za sučeljeni spoj za svaki milimetar debljine lima u vodoravnom položaju jakost struje iznosi približno 30 A. Prilikom zavarivanja u prisilnom položaju jakost je struje zavarivanja 25 % manja. Kod automatiziranog TIG zavarivanja jakost struje zavarivanja veća je nego kod ručnog i to za onoliko koliko se može povećati brzina zavarivanja. [11]

Zavarivanje TIG postupkom može se izvesti istosmjernom električnom strujom kada je elektroda spojena na plus pol (DC – *Electrode Positive*), kada je elektroda spojena na minus pol (DC – *Electrode Negative*) i izmjeničnom električnom strujom (AC). Na slici 33. prikazana su sva tri slučaja i raspodjela topline Q za dane uvjete polarizacije.



Slika 33. Smjer gibanja nosilaca naboja i intenzivnost zagrijavanja ovisno o vrsti i polaritetu struje [19]

Električni luk istosmjerne struje zavarivanja uz elektrodu na minus polu primjenjuje se za zavarivanje svih metala osim magnezija, aluminija i njihovih legura. Između elektrona s većom kinetičkom energijom i iona dolazi do kolizije zbog koje dolazi do razvijanja toplinske energije (Q). Na elektrodi se generira 30 % ukupne topline, dok se na radnom komadu generira preostalih 70 %. Kako bi se dobio koncentrirani električni luk koji utječe na dublje protaljivanje, vrh elektrode može se zašiljiti, jer se elektroda manje zagrijava.

Električni luk istosmjerne struje zavarivanja s elektrodom na plus polu koristi se vrlo rijetko i u posebnim slučajevima. Koristi se u slučajevima kada je potrebno razaranje površinskih oksida na aluminiju i ostalim lakim metalima. Elektroda je jako opterećena, a električni luk je nestabilan.

Električni luk izmjenične struje zavarivanja primjenjuje se kod zavarivanja magnezija, aluminija i njihovih legura. Ovo je najbolji način za zavarivanje metala s oksidnim slojevima s većim talištem od samog metala. Kod toka elektrona prema elektrodi dolazi do razaranja oksidnog površinskog sloja, a kod toka na radni komad stvaraju duboko protaljivanje i na taj se način dobiva čisti zavareni spoj.

Na oblik zavarenog spoja jakost struje ima najveći utjecaj te je najbolji parametar za kontroliranje dubine penetracije i depozita. Jakost struje određuje se na temelju sljedećih faktora [24]:

- vrste električne struje,
- položaja zavarivanja,
- debljine osnovnog materijala,
- raspona jakosti struje uređaja,
- vrste i promjera elektrode i
- pripreme spoja.

3.5.2. Brzina zavarivanja

Brzina zavarivanja kod ručnog TIG postupka iznosi od 100 do 250 mm/min. Najpovoljnija je kada je dužina taline dva do tri puta veća od promjera volframove elektrode, a kod zavarivanja u prisilnom položaju znatno je manja (u suprotnom bi došlo do curenja taline pod utjecajem gravitacijske sile). Brzina zavarivanja utječe na penetraciju te na izgled površine zavara. [11]

3.5.3. Protok i vrsta zaštitnog plina

Osiguranje prikladne atmosfere koja se što lakše ionizira, zaštita vrha elektrode i taline od kontaminacije plinovima iz okoline zadatak je zaštitnih plinova. Oni direktno utječu na stabilnost i kvalitetu električnog luka, estetski izgled zavarenog spoja, geometrijske značajke te količinu para koje se oslobađaju tijekom procesa zavarivanja. Najčešći zaštitni plinovi koji se koriste u primjeni TIG postupaka su helij i argon. [15]

Protok plina kreće se od 4 l/min do 20 l/min, a prilikom TIG zavarivanja ovisi o [11]:

- vrsti materijala koji se zavaruje,
- jakosti struje zavarivanja,
- mjestu rada,
- tehnici zavarivanja i
- vrsti zaštitnog plina.

Zaštitni plinovi i njihova primjena kod TIG zavarivanja prikazani su u tablici 3. Zaštitni plinovi zaokruženi plavom bojom mogu se koristiti kod TIG zavarivanja nehrđajućih austenitnih čelika.

Tablica 3. Standardni zaštitni plinovi i njihova primjena kod TIG zavarivanja [27]

Proizvod	Tipske komponente mješavina s Ar	Grupa po HRN ISO 14175	Primjena
Argon		I1	visoko legirani i nelegirani čelici, aluminijски materijali, ostali neželjezni metali
Inoxmix H	2 % H ₂	R1	austenitni CrNi-čelici
	5 % H ₂	R1	(5 % i 7,5 % H ₂ potpuno mehanizirani
	7,5 % H ₂	R1	
Inoxmix N	1,25 % N ₂	SI1	duplex, super-duplex,
	2,5 % N ₂	SI1	potpuno austenitni CrNi-čelici
	15 % He, 1,25 % N ₂	SI3	
Helij 4.6		I2	aluminij (minus pol-zavarivanje), čelici (orbitalno zavarivanje)
Alumix He	30 % He	I3	aluminij, bakar
	50 % He	I3	nikal,
	70 % He	I3	čelici (orbitalno zavarivanje),
	90 % He	I3	TIG - zavarivanje istosmjernom strujom
Alumix N	0,015 % N ₂	SI1	aluminijски materijali i legure
Alumix He N	15 % He, 0,015 % N ₂	SI3	aluminijски materijali i legure
	30 % He, 0,015 % N ₂	SI3	
	50 % He, 0,015 % N ₂	SI3	
Argon 4.8		I1	materijali osjetljivi na plinove kao što su titan, niob, molibden, tantal, zaštita korjena
Formir plin (N ₂ -H ₂ mješavine)	5 % H ₂	F2	zaštita korjena kod visoko i nisko legiranih čelika
	10 % H ₂		
	15 % H ₂		

4. PODJELA I PRIMJENA ZAŠTITNIH PLINOVA ZA TIG ZAVARIVANJE NEHRĐAJUĆIH ČELIKA

Osiguranje prikladne atmosfere koja se može lagano ionizirati, zaštita vrha elektrode i taline od kontaminacije kisikom i drugim plinovima iz atmosfere zadaća je zaštitnog plina. Za tu svrhu koriste se inertni plinovi: argon (Ar), helij (He), dušik (N₂), vodik (H₂) i njihove mješavine. Zbog visoke cijene helija uglavnom se koristi argon i mješavine argona i dušika te mješavine argona i vodika. Optimalnim izborom zaštitnog plina ovisno o parametrima i vrsti zavarivanja može se poboljšati kvaliteta zavara te smanjiti troškovi. U tablici 4. prikazani su optimalni plinovi za pojedine vrste materijala. [28]

Tablica 4. Preporučeni zaštitni plinovi prilikom zavarivanja pojedinih materijala [28]

Plin / Materijal koji se zavaruje	Nelegirani i niskolegirani čelici	Nehrđajući čelici	Niklove legure	Bakrene legure	Aluminijске legure
Ar	+	+	+	+	+
Ar/He		+	+		
Ar/H ₂			+	+	+
He				+	+

Funkcije zaštitnog plina prilikom zavarivanja [28]:

- zaštita rastaljenog metala od plinova iz okoline (kisik, dušik),
- održavanje plazma električnog luka,
- povećanje stabilnosti električnog luka,
- utjecaj na oblik i dubinu penetracije zavara,
- utjecaj na estetski izgled samog zavara i
- utjecaj na razinu para prilikom zavarivanja.

4.1. Fizikalne karakteristike zaštitnog plina

Glavne karakteristike zaštitnog plina su:

1. Ionizacijski potencijal
2. Toplinska vodljivost
3. Disocijacija i rekombinacija
4. Čistoća plina
5. Gustoća plina

4.1.1. Ionizacijski potencijal

Ionizacijski potencijal energija je izražena u elektron voltima (eV), potrebna za uzimanje jednog elektrona od atoma plina pretvarajući ga u ion. Kako se molekularna masa plina povećava, vrijednost potencijala ionizacije smanjuje se. Ionizacijski potencijal ima također veliki utjecaj na stabilnost električnog luka i paljenje. [28]

4.1.2. Toplinska vodljivost

Toplinska vodljivost pokazuje kako pojedini plin može voditi toplinu. Ona utječe na prijenos topline između plazme i rastaljenog materijala te na radijalni gubitak topline od centra prema rubovima električnog luka. Iz toga zaključujemo da plin koji ima veću toplinsku vodljivost vodi toplinu iz jezgre prema van, što rezultira širom jezgrom električnog luka i višom temperaturom jezgre električnog luka. [28]

4.1.3. Disocijacija i rekombinacija

Prilikom zagrijavanja na visoke temperature unutar električnog luka, zaštitni plinovi čije su molekule građene od više atoma (vodik, kisik) razbijaju se ili disociraju u atome od kojih su građene molekule. Nakon toga atomi su barem djelomično ionizirani i tvore slobodne elektrode i protok struje. Kada disocirani plin dođe u kontakt s relativno hladnom površinom radnog komada, atomi se rekombiniraju i otpuste toplinu. Toplina rekombinacije djeluje na plin tako da se ponaša kao da ima višu toplinsku vodljivost. [28]

4.1.4. Čistoća plina

Ovisno o tehnologiji zavarivanja i vrsti materijala koji se zavaruje, čistoća plina može imati veliki utjecaj na kvalitetu zavara. Vrlo male količine nečistoća u zaštitnom plinu mogu

značajno utjecati na brzinu zavarivanja, ponašanje taline, skrućivanje zavora i poroznost zavora. [28]

Do kontaminacije zaštitnog plina može doći već prilikom punjenja u bocu, iako je puno veća mogućnost da će nečistoće ući negdje između spremnika plina i pištolja za zavarivanje. Zbog toga treba obratiti pozornost na pravilno konstruiranje ventila i sustava za provođenje plina do zavora (pištolj za zavarivanje i cijevi).

Neki metali, npr. titan imaju vrlo niske tolerancije na čistoću zaštitnog plina te zahtijevaju zaštitne plinove vrlo visoke čistoće, dok npr. ugljični čelik ima visoke tolerancije na čistoću plina. [28]

4.1.5. *Gustoća plina*

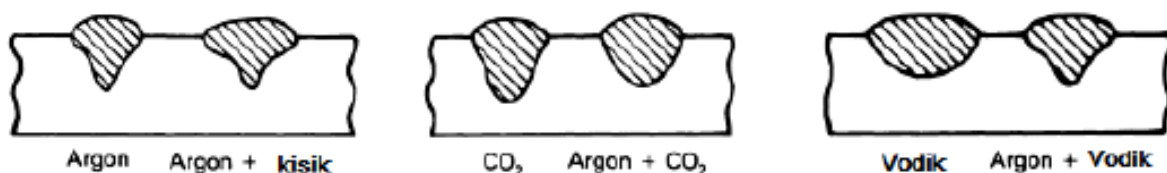
Efikasnost zaštitnog plina uvelike ovisi o gustoći plina. Kako bi se osigurala adekvatna zaštita taline zavora, plinovi teži od zraka (argon i ugljični dioksid) trebaju manji protok plina prilikom zavarivanja, dok lakši plinovi poput helija trebaju veći protok. [28]

4.2. Opis zaštitnih plinova kod TIG zavarivanja

Zaštitni plinovi koji se koriste kod TIG zavarivanja:

1. Argon
2. Helij
3. Vodik
4. Dušik

Na slici 34. prikazan je utjecaj zaštitnih plinova i plinskih mješavina na izgled zavora.



Slika 34. Utjecaj zaštitnih plinova i plinskih mješavina na izgled zavora

4.2.1. Argon

Kod TIG zavarivanja argon je najupotrebljavaniji zaštitni plin, a dobiva se iz atmosfere odvajanjem od ukapljenog zraka.

Argon ne sudjeluje u kemijskim reakcijama s talinom materijala (inertan je), karakterizira ga niska toplinska vodljivost, što ima za posljedicu kompaktniji električni luk veće gustoće. Zbog usmjerenja energije na usko područje, kada se koristi argon kao zaštitni plin dobiva se manja dubina penetracije i manje protaljivanje. To je korisno kod zavarivanja u prisilnim položajima (manje tečenje taline) i kod zavarivanja tankih materijala. [29]

Ionizacijski je potencijal argona 15,7 eV, zbog čega može lako pretvoriti atome u ione što osigurava dobro paljenje električnog luka i stabilnost električnog luka pri zavarivanju istosmjernom strujom na negativnom polu, a kod upotrebe izmjenične struje karakterizira ga jako dobro čišćenje oksidnog sloja. [6]

Čistoća argona važna je prilikom zavarivanja te iznosi minimalno 99,95 % i prihvatljiva je za većinu metala koji se zavaruju TIG postupkom zavarivanja. Kod zavarivanja vatrootpornih i reaktivnih (molibden, titan, tantal) metala minimalna je čistoća argona 99,9977 %. [29]

U praksi se argon češće upotrebljava od helija zbog [29]:

- niže cijene i veće dostupnosti,
- veće gustoće,
- potrebnog manjeg protoka,
- većeg ionizacijskog potencijala i
- lakše uspostave električnog luka.

4.2.2. Helij

Helij je inertni jednoatomni plin male mase i gustoće, a dobiva se odvajanjem od zemnog plina. Cijena mu je puno veća nego argonu, zbog čega se u Europi gotovo i ne koristi. Koristi se kod zavarivanja gdje je potreban veliki unos topline, čime omogućava veću žitkost taline, veću dubinu provara i veću brzinu zavarivanja. Primjenjuje se u plinskim mješavinama kod zavarivanja korozijski postojanih čelika te kod aluminija i magnezija koji su osjetljivi na uključke oksida. Česta je kombinacija argona i helija kojom se postiže veća brzina

zavarivanja i penetracija u odnosu na TIG zavarivanja s čistim argonom kao zaštitnim plinom. [6]

Električni luk izrazito je stabilan te se primjenjuje kod zavarivanja visokim gustoćama struje. Postotak čistoće kod zavarivanja minimalno je 99,99 %.

Ionizacijski potencijal helija veći je nego kod argona (24,5 eV), što rezultira težim paljenjem električnog luka, pogotovo kod manjih jakosti električne struje. U usporedbi s argonom, za jednaku jačinu struje i dužinu električnog luka, helij prenosi više topline na radni komad i ima širi električni luk. Zbog male mase potrebne su veće brzine protoka plina, zbog čega dolazi do veće potrošnje samog plina i većih troškova. [29]

4.2.3. Vodik

Vodik je plin bez boje, mirisa i okusa. Ima najmanju masu i najveću toplinsku vodljivost, zbog čega se toplina može vrlo brzo prenijeti od zavara električnim lukom. Koristi se kao mješavina u visoko temperaturnim operacijama, poput zavarivanja nehrđajućih austenitnih čelika i niklovih legura. Najčešće se miješa s argonom. Zbog mogućnosti pojave vodikove poroznosti u zavaru, potrebno je biti vrlo oprezan pri zavarivanju s dodatkom vodika. Količina vodika u mješavini iznosi najviše 15 % te se izbjegava zavarivanje u više prolaza. [29]

4.2.4. Dušik

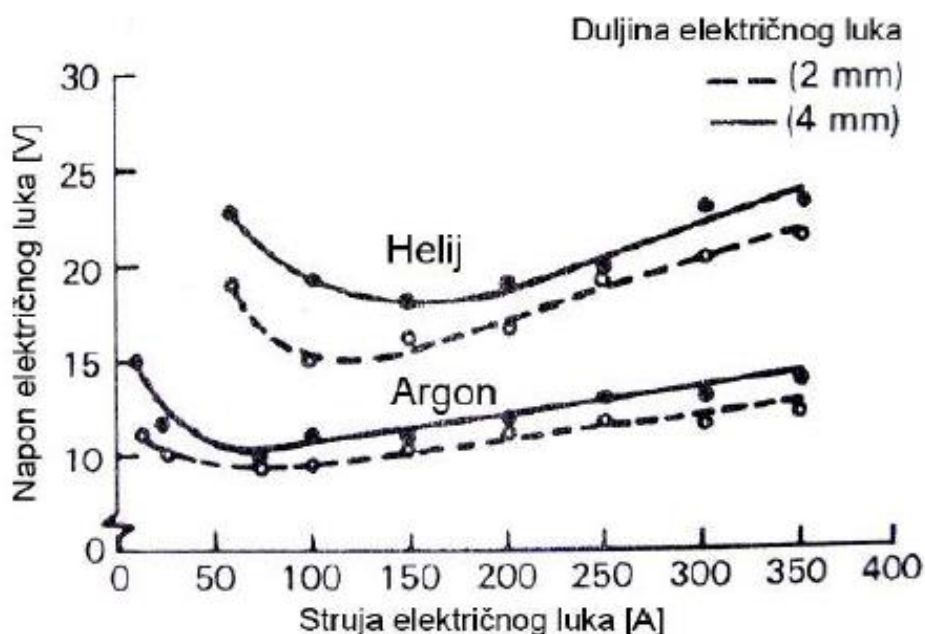
Dušik ima veću toplinsku vodljivost od argona. Kod zavarivanja metala koji imaju visoku toplinsku vodljivost (npr. bakar) koristi se u kombinaciji s argonom (do 3 % dušika). Mješavine dušika koriste se za zavarivanje samo nekih metala, poput duplex čelika (zbog stvaranja austenitne strukture dodatkom dušika), austenitnih čelika i niklovih legura. Izrazito povećanje mogućnosti stvaranja pukotina sprječava dušikovu upotrebu kod ostalih metala.

4.3. Karakteristike argona i helija

Gustoća argona približno je deset puta veća od gustoće helija, a tri puta od gustoće zraka. Ona je ujedno i glavni faktor učinkovitosti djelovanja plina. Nakon izlaska iz sapnice argon formira omotač preko područja zavara te ga na taj način štiti od oksidacije i drugih nepovoljnih utjecaja.

U usporedbi s argonom, upotreba helija zahtjeva veću količinu plina. Za ekvivalentan učinak zaštite helijem potreban je 2 - 3 puta veći protok, nego kada se koristi argon.

Odnos napon – struja na elektrodi u argonu i heliju važna je karakteristika mješavina plinova. Dobiveni napon, za sve struje za ekvivalentnu dužinu luka, značajno je veći kod helija, nego kod argona. Slika 35. prikazuje odnos između struje električnog luka i napona električnog luka prilikom zavarivanja aluminija TIG postupkom s argonom/helijem.



Slika 35. Veza napona i struje električnog luka u odnosu na zaštitne plinove argon i helij [29]

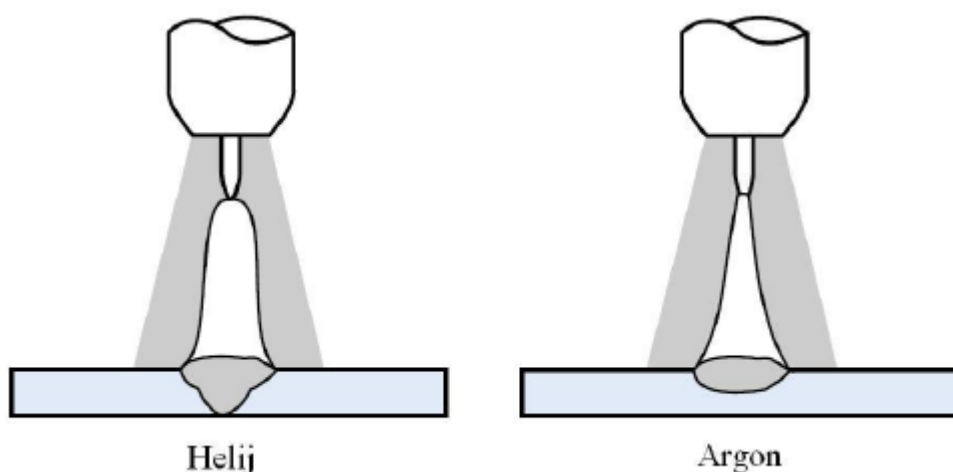
Na slici je jasno vidljivo da je napon električnog luka prilikom zavarivanja argonom značajno manji od napona električnog luka prilikom zavarivanja helijem, a kod iste jačine struje toplinska vodljivost kod argona znatno je manja nego kod helija.

Helij je bolji izbor od argona kod slučajeva zavarivanja debelih materijala, materijala veće toplinske vodljivosti ili materijala visoke točke tališta. [29]

Argon se koristi kod zavarivanja nižim strujama, zbog toga što pri nižim strujama argon pruža bolju kontrolu električnog luka. Ispod struja od 50 A, daljnjim smanjenjem struje dolazi do rasta napona kod argona (slika 36.). To je slučaj i kod helija, ali u rasponu struje od 50 A do 150 A, a to su struje kod kojih se obično zavaruju tanki materijali. [29]

Glavne razlike argona u odnosu na helij:

- slabija toplinska vodljivost,
- slabiji električni luk i lakša uspostava električnog luka,
- bolja čistoća oksidnog sloja,
- približno deset puta veća težina od helija,
- manja cijena i lakša dobavljaljivost,
- manje protaljivanje kod iste jakosti struje i vrste električne struje zavarivanja i
- za isti intenzitet zaštite taline potrebno je 2 - 3 puta više helija nego argona.



Slika 36. Električni luk i izgled zavora kod zavarivanja zaštitnim plinom argonom/helijem [28]

4.4. Plinske mješavine

Uz korištenje čistih inertnih plinova, argona i helija, česta je i upotreba njihovih mješavina u različitim omjerima, kombinirajući njihova povoljna svojstva.

Mješavine argona i vodika koriste se u specijalnim slučajevima kao što je automatizirano zavarivanje cijevi od nehrđajućih čelika, kod kojih vodik ne uzrokuje poroznosti i vodikom uzrokovane pukotine. Ovisno o debljini osnovnog materijala i vrsti spoja za svaku pojedinačnu primjenu ovisi količina vodika koja se može dodati u mješavinu. Tablica 5. daje pregled karakteristika zavarivanja pri korištenju različitih zaštitnih plinova.

Tablica 5. Usporedba karakteristika zavarivanja pri korištenju različitih zaštitnih plinova [18]

Karakteristika	Argon	Mješavina Ar/He	Helij
Brzina zavarivanja	Smanjena	Veća nego kod 100% Ar	Veća
Penetracija	Smanjena	Veća nego kod 100% Ar	Povećana
Uspostava luka	Laka	Bolja nego kod 100 % He	Otežana
Oblik luka	Uži, fokusiran	uži nego kod 100% He	Širi
Stabilnost luka	Dobra	Bolja nego kod 100% He	Niža kod manjih struja
Čišćenje oksida	Dobro	Sličnije nego 100% Ar	Loše
Napon luka	Manji	Srednja	Veći
Protok	Manji	Veći nego kod 100% Ar	Povećan
Cijena	Niža	Veći nego kod 100% Ar	Veći nego kod 100 % Ar

Za zavarivanja različitih materijala koriste se plinske mješavine u raznim omjerima. Kod TIG zavarivanja za različite metale, neke od mješavina zaštitnog plina koje se koriste su [29]:

- Alumaxx Plus – pogodan je za gotovo sve vrste TIG postupaka (ručno, automatsko, orbitalno i robotsko) zavarivanje. Sastoji se od 70% argona i 30 % helija i koristi se za zavarivanje aluminija i njegovih legura, bakra i bakrenih legura, nikla i niklovih legura svih debljina.
- Helij 75 % i argon 25 % - za debele dijelove aluminija i aluminijskih legura, debelih dijelova bakra i bakrenih legura.
- Argon + 1 % do 3 % vodika - za zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika te nikla i niklovih legura.
- Argon + 5 % vodika - za zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika. Pogodan je za gotovo sve vrste TIG postupaka (ručno, automatsko, orbitalno i robotsko) zavarivanja.
- Formir plin ($N_2 - H_2$) mješavine – za zaštitu korijena kod visoko i nisko legiranih čelika.

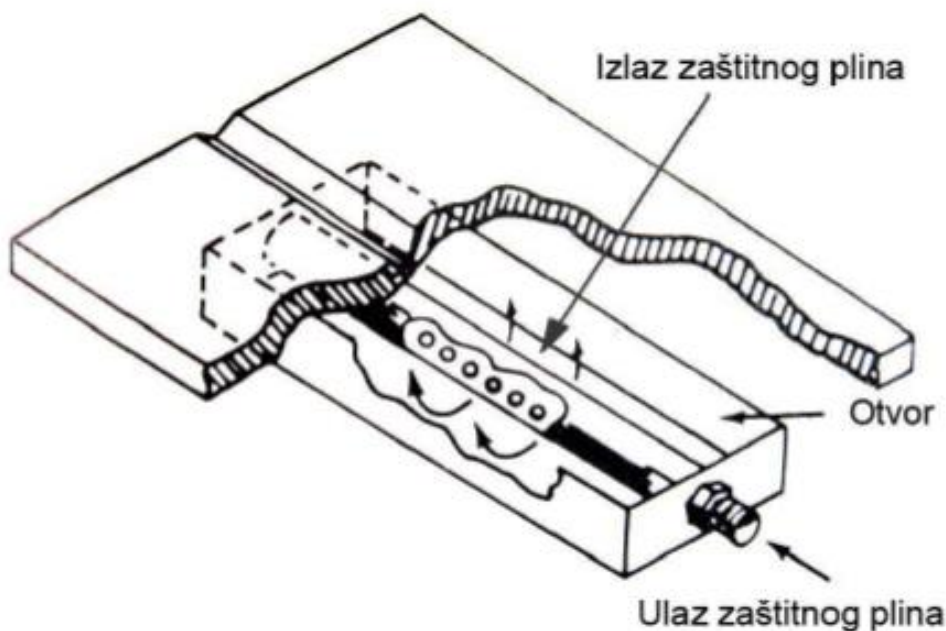
Uz konstantne parametre (struja, vrsta i promjer netaljive volframove elektrode, udaljenosti elektrode od radnog komada, kuta zašiljenosti elektrode, itd.) utjecaj zaštitnog plina na penetraciju i geometriju zavarenog spoja prikazan je na slici 37.



Slika 37. Utjecaj vrste plina i mješavine plinova na oblik zavora i penetraciju [26]

4.4.1. Zaštita korijena zavora

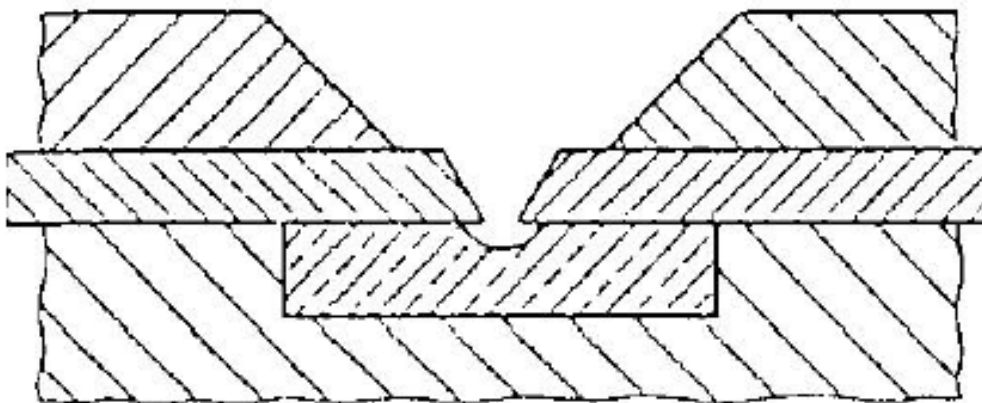
Zbog mogućih onečišćenja raznim nečistoćama koje se nalaze u atmosferi i koja nepovoljno djeluju na mehanička svojstva zavora potrebno je provesti zaštitu korijena zavora. Postupkom zaštite dobiva se dobra površina i smanjena mogućnost oksidacije. Najčešći su plinovi koji se koriste za zaštitu korijena zavora argon, mješavine argona i vodika ($\text{Ar} + 2-5\% \text{H}_2$), argona i dušika ($\text{Ar} + 1-2,5\% \text{N}_2$) i tzv. formir plin koji se sastoji od $\text{Ar} + 1-30\% \text{H}_2$ ili $\text{N}_2 + 1-30\% \text{H}_2$. Zrak se odstranjuje zaštitnim plinovima te se nakon stvaranja zaštitne atmosfere održava blagi tlak unutar prostora gdje se nalazi zaštitni plin. Nakon završetka postupka zavarivanja plin se ispušta. Za zaštitu korijena zavora može se koristiti naprava u obliku kućišta koja ima otvor s gornje strane kroz koju slobodno struji zaštitni plin, prikazana na slici 38. Naprava se pričvršćuje na korijen zavora te se u nju pusti zaštitni plin koji izlazi prema korijenu zavora nakon čega je moguće provesti zavarivanje bez opasnosti od onečišćenja. Pri postupku potrebno je paziti da tlak plina u prostoru naprave nije velik, jer bi prilikom zavarivanja moglo doći do izbacivanja taline prema gornjoj strani zavora. [26, 36]



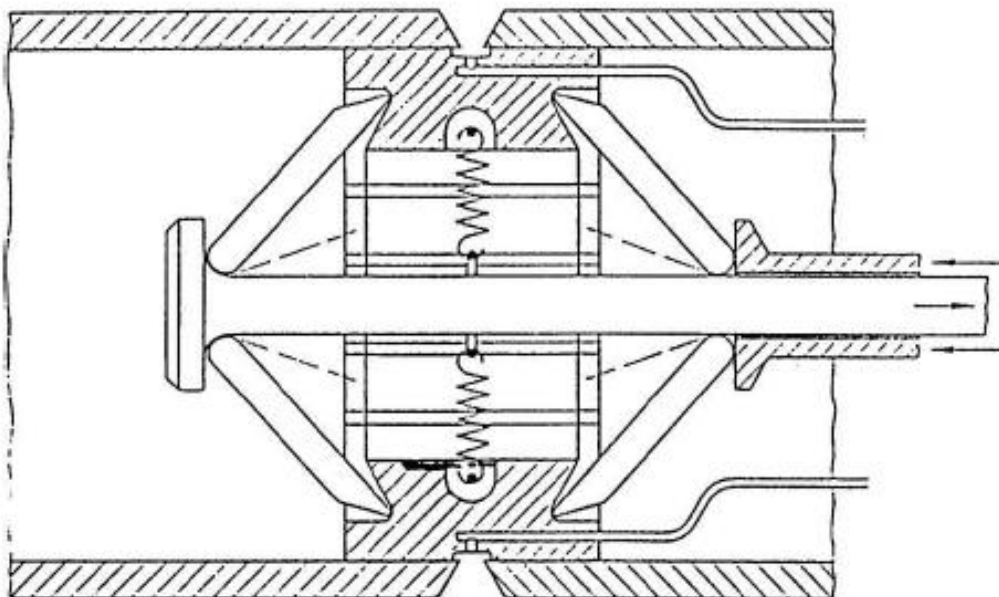
Slika 38. Zaštita korijena zavora u obliku kućišta [6]

Kod zavarivanja cijevi postoje različita rješenja zaštite korijena zavora. Postoji mogućnost da se u cijev stave zatvori i kroz njih upuhuje zaštitni plin. Jedno od rješenja prikazano je na slici 40. koje je kompliciranije te je za njegovu primjenu potrebna dodatna naprava, ali je kvaliteta veća te zahtijeva manju količinu zaštitnog plina.

Još jedno od rješenja zaštite korijena zavora su i pločice od bakra koji je dobar vodič topline. U procjepu vidljivom na slici 39. akumulira se zaštitni plin te na taj način tvori zaštitnu atmosferu potrebnu za zavarivanje.

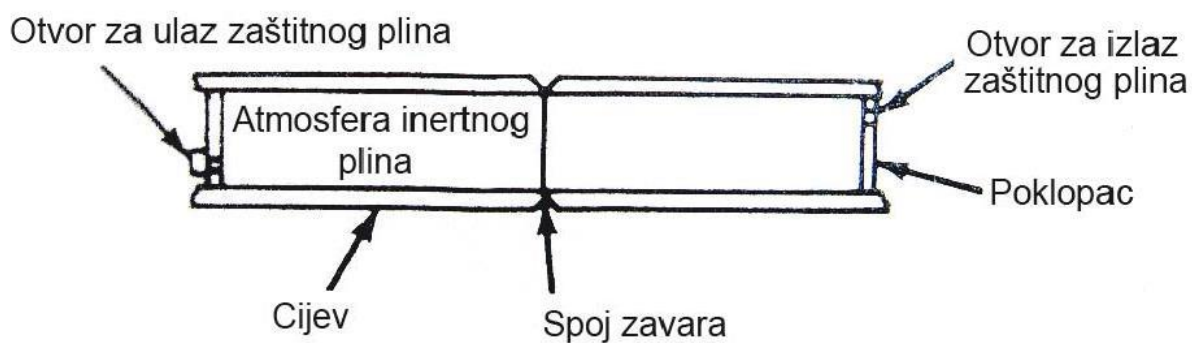


Slika 39. Zaštita korijena zavora pomoću bakrene pločice [36]



Slika 40. Zaštita korijena zavora u obliku kućišta [36]

Postoje rješenja kod zavarivanja cijevi da se na otvore postave poklopci kroz koje se može upuhivati zaštitni plin, čime se stvara potrebna zaštitna atmosfera unutar cijevi (slika 41.). Kod ovog slučaja potrebno je na suprotnoj strani od otvora za ulaz zaštitnog plina imati otvor za izlaz plina zbog mogućnosti stvaranja tlaka i izbacivanja taline prema gornjoj strani zavora. [26]



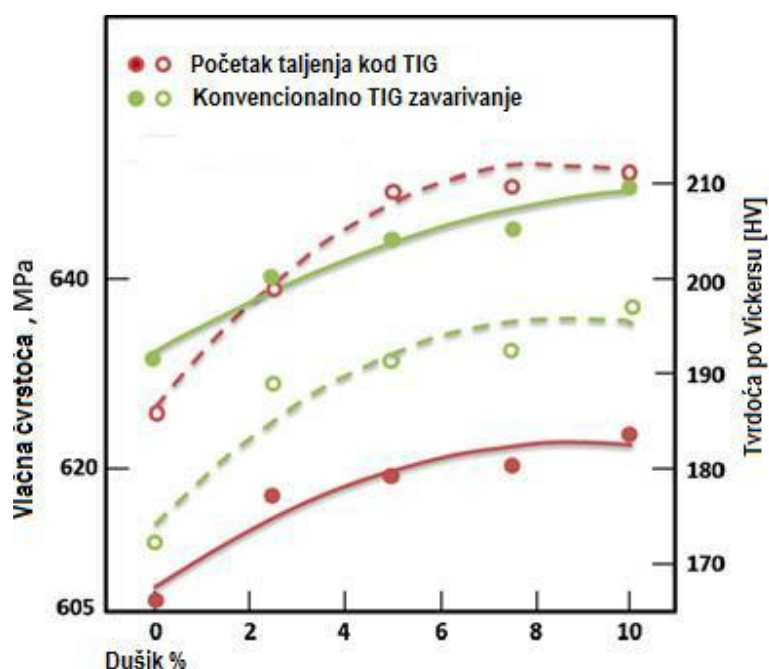
Slika 41. Zaštita korijena zavora cijevi pomoću poklopaca [36]

4.4.2. Utjecaj zaštitnih plinova na mehanička svojstva zavarava

Primjena zaštitnih plinova, bez obzira na vrstu plina, ima značajan utjecaj na mehanička svojstva zavarava. Vrsta zaštitnog plina najviše utječe na penetraciju i skrućivanje, što može utjecati na mikrostrukturu dobivenog zavarava. Lošija mehanička svojstva mogu se pojaviti uslijed isparavanja legirajućih elemenata poput magnezija u slučaju korištenja zaštitnih plinova koji imaju veću toplinsku vodljivost. Parametrima zavarivanja primarno se kontroliraju svojstva zavarava, dok zaštitni plin može utjecati na čvrstoću, duktilnost, žilavost i korozijsku postojanost zavarava. Kod zavarivanja debelih dijelova, korištenjem čistog argona kao zaštitnog plina moguća je poroznost zavarava i nedostatak penetracije i taljenja, dok je ovisno o dodatnom materijalu, za veći oksidacijski potencijal zaštitnog plina čvrstoća i žilavost zavarava niža.

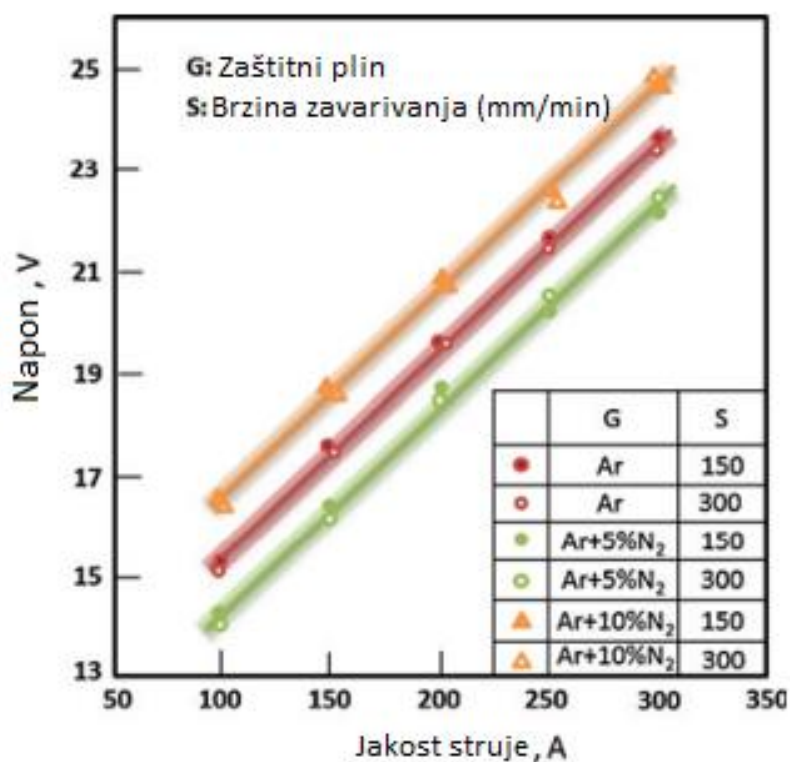
Dodavanjem helija argonu, zbog bolje toplinske vodljivosti helija, više se topline prenese u zavar zbog čega je veća temperatura zavarava, a samim time bolja penetracija i duže vrijeme skrućivanja, što omogućuje zarobljenim plinovima više vremena za napuštanje zavarava.

Dodavanjem dušika ili vodika mješavini zaštitnog plina poboljšava se postupak zavarivanja te se dobiva bolji izgled zavarava. Dušik je jedan od najučinkovitijih elemenata za povećanje mehaničke čvrstoće i otpora rupičastoj koroziji za austenitne nehrđajuće čelike. Na slici 42. prikazan je utjecaj dušika na vlačnu čvrstoću i tvrdoću zavarava, dok je na slici 43. dan prikaz utjecaja dušika na brzinu zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika. [38]



Slika 42. Utjecaj dodavanja dušika argonu na mehanička svojstva zavarava [38]

Dodavanje vodika u argon povećava volumen rastaljenog materijala i omogućuje veće brzine zavarivanja, međutim postoji i mogućnost pojave pukotina u zavaru uzrokovanih vodikom zbog čega mu je uporaba ograničena. Povećanjem udjela vodika uočeno je da se povećava i veličina zrna te smanjuje udio ferita, što negativno utječe na mehanička svojstva zavora. Dodavanje vodika u mješavinu zaštitnog plina (najčešće argonu) povećava ulazni napon i unos topline, što uzrokuje sporije hlađenje rastaljenog materijala te time olakšava transformaciju feritne faze u austenitnu. Povećani unos topline također doprinosi povećanju naprezanja u zavaru. [38]



Slika 43. Utjecaj dušika na brzinu zavarivanja [38]

4.4.3. Pogreške u zavarenim spojevima uzrokovane zaštitnim plinom

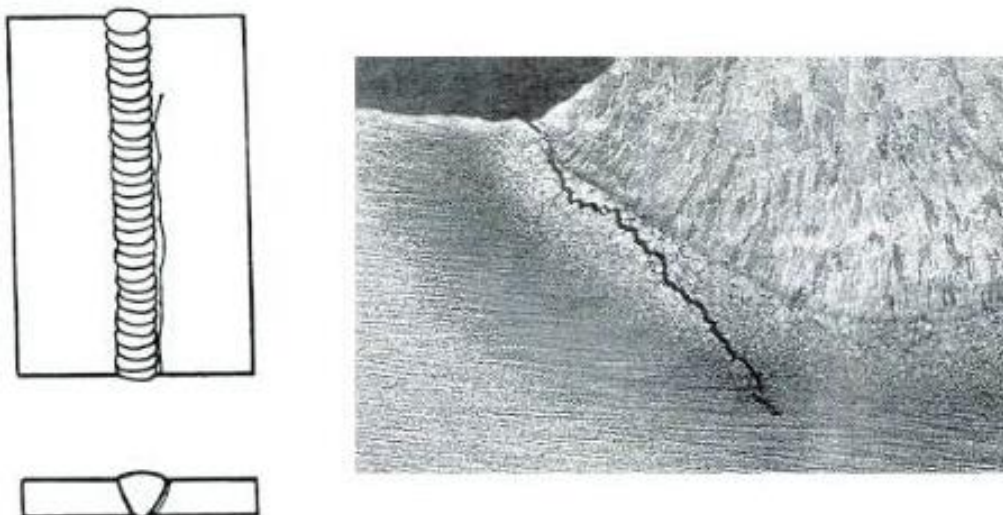
Pogreške u tehnikama spajanja u pravilu mogu dovesti do narušavanja pouzdanosti dobivenog proizvoda u uvjetima primjene. Prema ISO 6520/1982 i EN 26520/1992 pogreške u zavarenim spojevima metala izvedenog taljenjem svrstane su u šest skupina (46) [41]:

- pukotine (100),
- šupljine ili poroznost (200),
- uključci čvrstih tijela (300),
- nedovoljno vezivanje i penetracija (400),
- pogreške oblika (500) i
- ostale pogreške (600).

Pukotine su najopasnije pogreške u zavarenim spojevima i u pravilu nisu dopuštene. Djelovanjem promjenjivih naprezanja s vremenom mala pukotina može narasti i dovesti do loma zbog zamora ili krhkog loma. Prema uzroku nastajanja, pukotine mogu biti tople ili hladne.

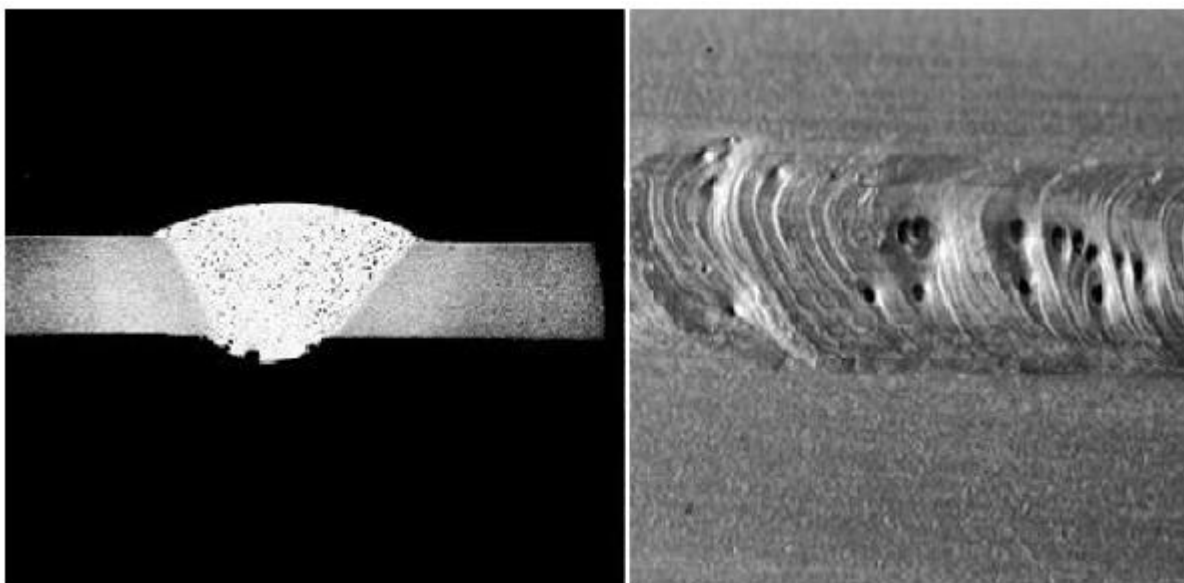
Tople pukotine nastaju tijekom hlađenja taline nakon zavarivanja, a pojavljuju se po granicama zrna zbog gubitka sposobnosti zone taljenja da izdrži naprezanja zbog skupljanja u posljednjoj fazi skrućivanja. Uvjeti koji pogoduju nastanku su nečistoće, legiranje, neodgovarajući parametri zavarivanja, nepovoljan oblik žljeba, a ponajviše izbor neodgovarajućeg dodatnog materijala.

Hladne pukotine nastaju ponajviše nakon zavarivanja čelika povišene i visoke čvrstoće na temperaturama ispod 300 °C (slika 44.). Mogu biti uzdužne, poprečne na zavar ili na prijelazu u osnovni materijal. Najčešći su uzroci nastanka hladnih pukotina: prisutnost vodika u zavaru, sklonost materijala otvrdnjavanju (pogotovo u ZUT-u), naprezanja zbog očvršćivanja zvara i nepovoljan položaj uključaka u zavaru. [41]



Slika 44. Hladna pukotina u ZUT-u sučeljenog spoja [40]

Poroznost ili šupljine najčešći su oblik greške zavara u zoni taljenja, a predstavljaju mjesta ispunjena stlačenim plinom (slika 45.). Posljedica su različite topljivosti plinova (vodika, dušika i kisika) u tekućem i krutom stanju materijala. Hlađenjem taline plinovi ostaju zarobljeni u metalu, a plinski mjehurići izlazeći iz zavara ponekad ostavljaju vidljive šupljine na površini zavara. Najčešći su uzrok poroznosti u zavaru nečistoća i vlaga na mjestu zavarivanja i u dodatnom materijalu, slaba zaštita tijekom zavarivanja, neispravni parametri i tehnika rada pri zavarivanju. [41]



Slika 45. Poroznost u sučeljenom spoju [39]

5. ISPITIVANJE OTPORNOSTI NA KOROZIJU KOD ZAVARENIH SPOJEVA NEHRĐAJUĆIH ČELIKA

Korozija je spontano razaranje materijala pod djelovanjem okolnog medija - plina, kapljevine ili krutih agresivnih čestica, zbog kemijskih ili elektrokemijskih procesa.

Svoju intenzivnu primjenu i razvoj nehrđajući čelici prvenstveno zahvaljuju svojim dobrim antikorozivnim svojstvima, odnosno mogućnošću pasivacije u mnogim sredinama. U vlažnim atmosferama i u raznim vodenim otopinama koje su aerirane ili sadrže oksidanse, pasivnost nehrđajućih čelika dolazi do izražaja.

Zavareni spojevi nehrđajućih čelika na konstrukciji mogu predstavljati veliku opasnost uslijed pojave najčešće rupičaste korozije, ali i na ostalim lokalnim korozijskim fenomenima poput korozije u procjepu, napetosne korozije, mikrobiološke korozije, interkristalne korozije, itd. Kako bi se spriječila pojava korozijskog razaranja, potrebno je pravilno i pažljivo odabrati odgovarajuće vrste nehrđajućeg čelika za pojedinu specifičnu namjenu (sredinu i eksploatacijske uvjete kojima će konstrukcija biti izložena) i tehnološki ispravno provesti tehnologiju zavarivanja (postupak, parametri, dodatni materijal, itd.). [2] [31]

5.1. Oblici korozije kod nehrđajućih čelika

Osam osnovnih oblika korozije su [30]:

- opća,
- galvanska,
- korozija u procjepu,
- rupičasta (pitting),
- interkristalna,
- selektivna,
- erozijska i
- napetosna.

Kod korozijski postojećih čelika mogu se izdvojiti četiri karakteristična i najčešća oblika korozije:

1. korozija u procjepu
2. rupičasta
3. interkristalna
4. napetosna

5.1.1. Korozija u procjepu

Konstruktivna rješenja koja imaju za posljedicu nastanak procjepa između pojedinih dijelova konstrukcije, izrađene od nehrđajućih čelika, mogu dovesti do pojave iniciranja korozijskih procesa isključivo u tom području uslijed nastanka lokalnih članaka diferencijalne aeracije, kao i nagomilavanja agresivnih čimbenika iz medija unutar procjepa. [31]

Broj međusobno povezanih čimbenika (metalurških i geometrijskih) te značajke medija kod nehrđajućih čelika utječu na iniciranje i propagiranje korozije u procjepu.

Smanjenje sklonosti prema koroziji u procjepu postiže se [31]:

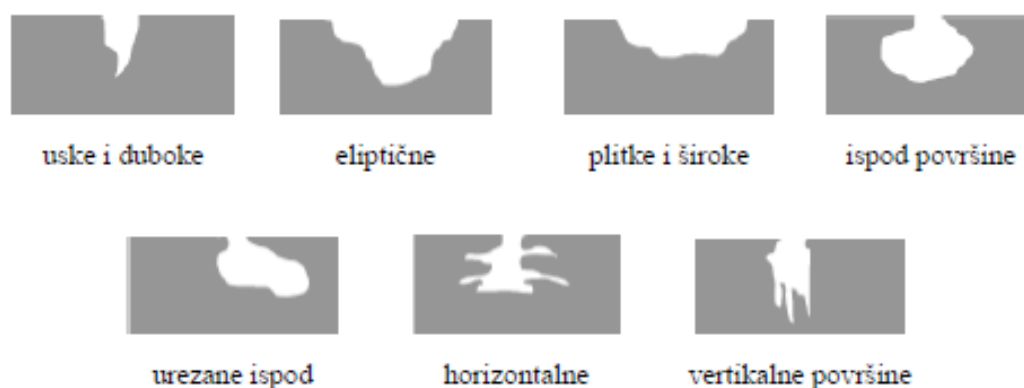
- odgovarajućim projektnim rješenjima i tehnološkom disciplinom,
- korištenjem čelika s većim udjelima Cr, Mo, N i Cu,
- katodnom zaštitom,
- izbjegavanjem naslaga,
- drenažom i
- izbjegavanjem stagnacije medija (miješanje, cirkulacija, aeracija).

5.1.2. Rupičasta korozija (pitting)

Rupičasta korozija najčešći je oblik elektrokemijskog razaranja uzrokovanog lokalnom depasivacijom metala koji su obično u pasivnom stanju poput nehrđajućih čelika. Ova korozija nastaje u agresivnim elektrolitima, a pritom nastaju korozijski članci s vrlo velikom katodnom (pasivnom) i malom anodnom (aktivnom) površinom.

Kemijske reakcije unutar jamice iste su kao i kod korozije u procjepu. Rupičasta korozija smatra se auto-katalitičkim procesom. Kada jamica (pit) nastane i pokrene se korozijski proces dolazi do znatnih promjena u mediju unutar jamice koji postaje osiromašen katodnim

reaktantima, obogaćen metalnim kationima i kloridima. Slika 46. prikazuje oblike jamica kod rupičaste korozije.



Slika 46. Oblici jamica kod rupičaste korozije [30]

Otpornost na rupičastu koroziju može se procijeniti na osnovi vrijednosti ekvivalenta otpornosti prema pittingu (*pitting resistance equivalent number*) ili PREN odnosno tzv. djelotvorne sume elemenata (DS).

Smanjenje sklonosti prema rupičastoj koroziji postiže se [33]:

- povećanjem otpornosti materijala (legiranjem s Cr, Mo, Ni),
- smanjenjem agresivnosti korozijskog okoliša,
- inhibicijom,
- deaeracijom,
- katodnom zaštitom,
- smanjenjem hrapavosti površine (poliranjem),
- čišćenjem površine (mehaničkim, kemijskim ili elektrokemijskim) i
- naknadnom obradom zavarenih spojeva (mehaničkom, kemijskom ili elektrokemijskom).

5.1.3. Interkristalna korozija

Ovaj oblik korozije nastaje ako su na granicama zrna iz nehrđajućih čelika izlučeni karbidi kroma i željeza. To se događa najbrže između 450 – 850 °C (najjače na oko 650 °C) ako se žareni materijal naglo ne ohladi u vodi ili u ulju. Takva legura postane nehomogena i korozivno manje stabilna, a zona oko svakog zrna podložna utjecaju medija, pogotovo kiselina.

Pojavljuje se samo ako su nehrđajući čelici u tzv. senzibiliziranom stanju kada su na granici zrna izlučene čestice krom - željezo - karbida (sa 70 – 90 % Cr) između kojih se nalazi legura s < 12 % Cr, odnosno ispod granice pasivnosti.

Smanjenje sklonosti prema interkristalnoj koroziji postiže se [31]:

- desenzibilizacijom toplinskom obradom (ugrijati na 1040 - 1175°C u ovisnosti od legure, pri čemu se štetni Cr_{23}C_6 otapa i naglo gasi u vodi),
- stabilizacijom dodatkom karbidotvoraca Ti (4 – 6 x %C), Nb (8 – 10 x %C), Ta (15 – 17 x %C) koji onemogućavaju spajanje ugljika s kromom te na taj način sprječavaju osiromašenje perifernih zona zrna i
- sprječavanjem izlučivanja karbida smanjivanjem sadržaja ugljika ispod 0,03% (onemogućuje se senzibilizacija, jer ne može doći do nastajanja Cr-karbida) i sadržaja dušika ispod 0,05% (da se spriječi senzibilizacija intergranularnim izlučivanjem Cr - nitrida).

5.1.4. Napetosna korozija

Ovaj oblik korozije nastupa kada je prisutna istovremena izloženost djelovanju agresivnog medija i vlačnog naprezanja. Nastupit će najčešće u hladno deformiranim lokalitetima, jer tamo ima zaostalih naprezanja poput hladno deformiranih koljena cjevovoda. Nastaje također i u okolini zavarenih mjesta gdje su povećana zaostala naprezanja.

Otkazi koji nastaju zbog ove vrste korozije neočekivani su, jer prije pojave pukotine na konstrukciji nema nikakvih naznaka po kojima bi se moglo naslutiti njeno iniciranje. Dosta često počinje pittingom pri čemu redovito najprije nastaju sitna klinasta žarišta pittinga koja se u početnom razdoblju indukcijskog perioda i inkubacije pojavljuju vrlo sporo. Zatim se na dnu nekih žarišta pojavljuju vlasaste pukotine koje se brzo šire i prodiru u materijal te se međusobno povezuju sve dok ne dođe do krhkog loma.

Sklonost nehrđajućih čelika napetosnoj koroziji može se smanjiti [33]:

- sniženjem sadržaja dušika ispod 0,04 %, odnosno povišenjem sadržaja ugljika i bakra,
- katodnom zaštitom uz niske gustoće električne struje,
- deaeracijom,
- sniženjem temperature kloridnih i lužnatih otopina,
- desenzibilizacijom za interkristalnu koroziju,

- dodatkom snažnih pasivatora i
- zamjenom austenitnih s austenitno - feritnim (dupleks) nehrđajućim čelicima koji su manje osjetljivi na ovaj tip korozije.

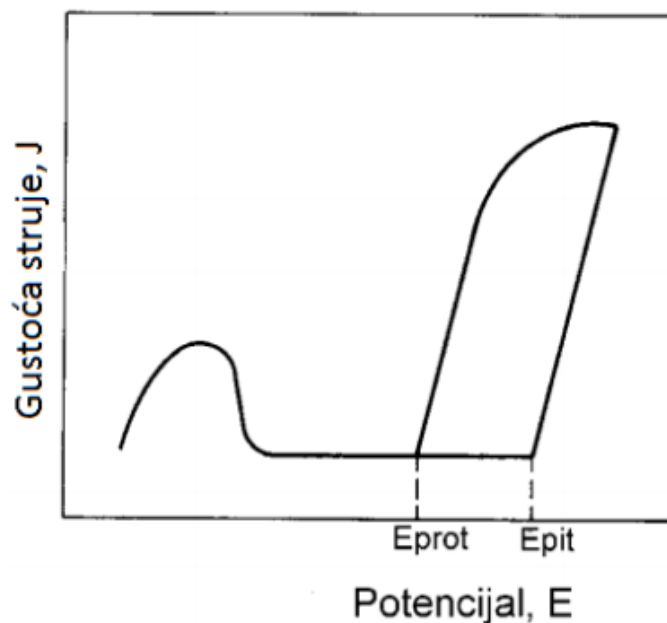
5.2. Ispitivanje rupičaste korozije

Metode koje se koriste za ispitivanje opće korozije ne mogu se primijeniti na ispitivanje lokalnog tipa korozije poput rupičaste korozije metala. Razvijene su posebne ubrzane metode za ocjenu otpornosti prema rupičastoj koroziji metala i legura s pasivnim filmom. Metode mogu biti elektrokemijske i neelektrokemijske. [34]

5.2.1. Elektrokemijska metoda

Ovom se metodom često ispituje sklonost nehrđajućih čelika prema rupičastoj koroziji. Određuje se potencijal pri kojem rupice počinju stabilno rasti (pitting potencijal, E_{pit}), potencijal kada se zaustavlja rast rupica (zaštitni potencijal, E_{prot}) i najniža temperatura pri kojoj dolazi do nastanka rupica (kritična temperatura pittinga, T_{pit}).

Ovisno o sastavu i strukturi nehrđajućeg čelika, pH vrijednosti i temperaturi korozivne sredine, određuju se vrijednosti ovih pokazatelja rupičaste korozije. Slika 47. prikazuje shematski prikaz određivanja otpornosti prema rupičastoj koroziji.



Slika 47. Shematski prikaz određivanja otpornosti prema rupičastoj koroziji elektrokemijskim metodama [34]

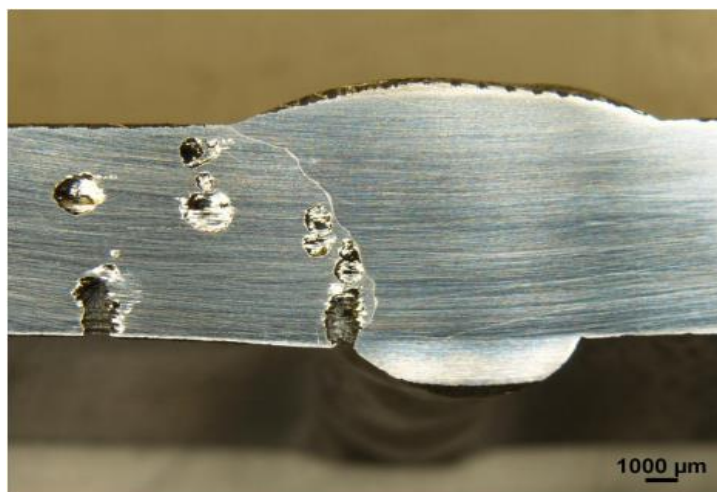
5.2.2. Neelektrokemijska metoda

Oksidacijsko-redukcijski potencijal otopine za ispitivanje mora biti pozitivniji od vrijednosti E_{pit} tokom ispitivanja rupičaste korozije. Željezni (III) klorid široko se koristi za ispitivanje rupičaste korozije nehrđajućih čelika, jer je njegov oksidacijsko-redukcijski potencijal pozitivniji od E_{pit} . [34]

5.2.3. Utjecaj zavarivanja na rupičastu koroziju

Jamice koje lagano korodiraju, pogotovo u atmosferi zasićenoj kloridima, nastaju zbog defekata poput ostatka troske i mikropukotine na metalu zavara. Ovisno o vrsti dodatnog materijala, odnosno vrsti obloge, troska će se različito skidati s metala zavara. Bazične obloge kod neprirodnog zavarivanja teško se skidaju, što daje dobru osnovu za ovu vrstu korozije.

Rupičasta korozija može nastati i na počecima, završecima zavara te između prolaza, odnosno na bilo kojoj površini koja je izložena zavarivanju. Slika 48. prikazuje pojavu rupičaste korozije u području zavara.



Slika 48. Rupičasta korozija u području zavarenog spoja [31]

6. EKSPERIMENTALNI RAD

6.1. Opis eksperimenta

Eksperimentalni rad proveden je u laboratorijima Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu. Cilj ovog eksperimenta bila je usporedba utjecaja zaštitnog plina na zavar šavnih cijevi iz visokolegirano Cr-Ni nehrđajućeg čelika. U eksperimentalnom dijelu pomoću okretaljke, provedeno je automatizirano orbitalno TIG zavarivanje dva para šavnih cijevi iz istog materijala. Kod zavarivanja jednog para korišten je argon kao zaštitni plin, dok je kod drugog para cijevi korištena mješavina 95 % argona i 5 % vodika. Ostali parametri zavarivanja isti su u oba slučaja kako bi se vidio utjecaj zaštitnog plina na zavar.

Eksperiment je proveden u kontroliranim uvjetima, a nakon strojne obrade uzoraka provedena je:

- vizualna kontrola,
- makroanaliza uzorka i
- korozijska ispitivanja.

6.2. Osnovni materijal

Kao osnovni materijal korišten je nehrđajući čelik oznake AISI 316L (W. Nr. 1.4404 ili po normi EN X2CrNiMo17-12-2). Osnovni je materijal u obliku cijevi, promjera 88,9 mm i debljine stjenke 2,6 mm. Mehanička svojstva osnovnog materijala prikazana su u tablici 6. To je austenitni Cr-Ni čelik, legiran molibdenom koji povećava otpornost na koroziju. Velika je otpornost osnovnog materijala na koroziju u prirodnim vodama, u atmosferi te u područjima gdje je koncentracija klorida niska. Sadržaj ugljika od 0,03 % onemogućuje stvaranje kromovih karbida, što osigurava otpornost prema interkristalnoj koroziji. Tablica 7. prikazuje kemijski sastav osnovnog materijala.

Tablica 6. Mehanička svojstva čelika AISI 316L prema normi HRN EN 10088-3:2014 [43]

Oznaka čelika		Mehanička svojstva					
EN	AISI	R _m , min N/mm ²	R _{p0,2} , min N/mm ²	R _{p1,0} , min N/mm ²	A ₅ , min %	KV, min J	HB, max
X2CrNiMo17-12-2	316L	500-700	200	235	40	100	215

Tablica 7. Kemijska svojstva čelika AISI 316L prema normi HRN EN 10088-3:2014 [43]

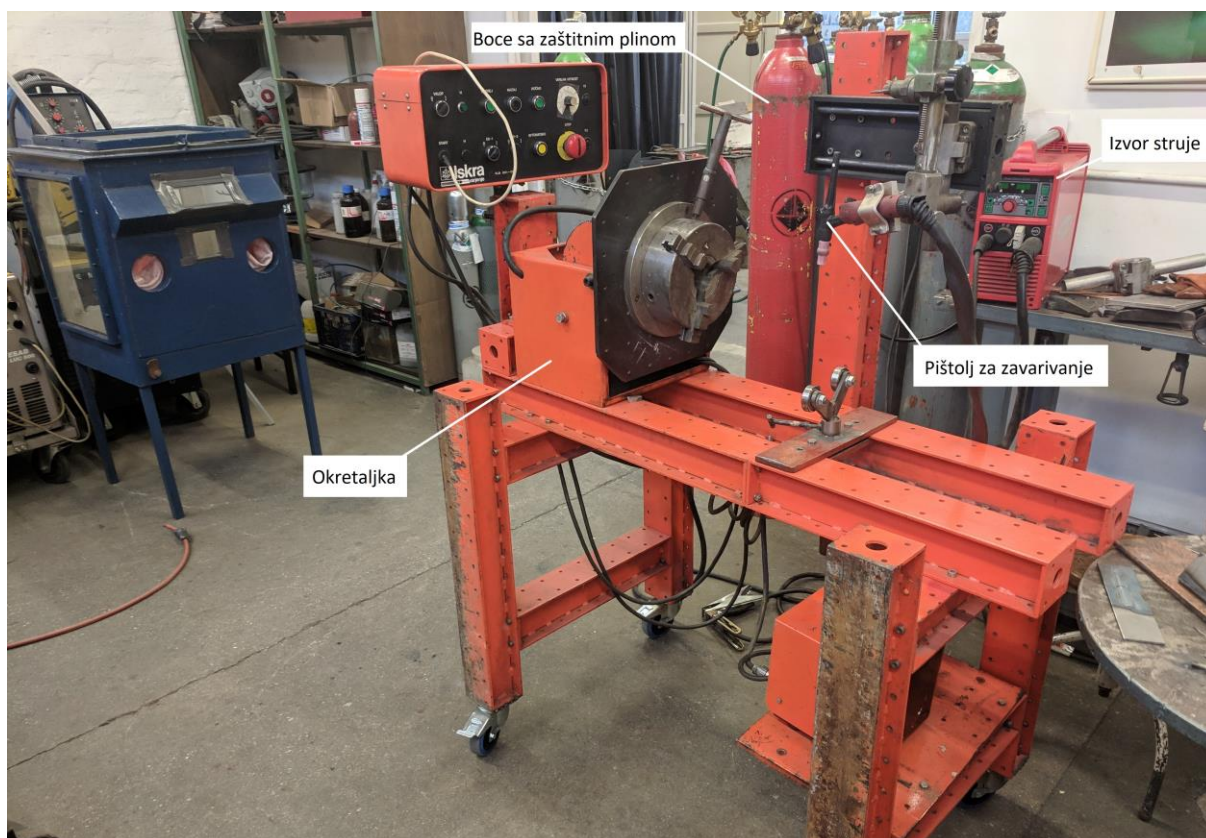
Element		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N
Udio [%]	Min	-	-	-	-	-	16,50	2,00	10,00	-
	Max	0,030	1,00	2,00	0,045	0,030	18,50	2,50	13,00	0,110

Na slici 49. prikazane su šavne cijevi korištene u eksperimentu nakon četkanja i čišćenja alkoholom. Vanjski je promjer cijevi 88,9 mm, debljina stijenke 2,6 mm, a duljina 250 mm.

**Slika 49. Cijevi iz nehrđajućeg čelika**

6.3. Oprema za zavarivanje

Na slici 50. prikazano je radno mjesto u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, gdje je izvršeno zavarivanje cijevi za potrebe eksperimenta. Na slici je vidljiva sva oprema korištena u procesu automatiziranog orbitalnog zavarivanja TIG postupkom.



Slika 50. Radno mjesto u Laboratoriju za zavarivanje

6.3.1. Izvor struje za zavarivanje

Uređaj tipa „MagicWave 2200 Job G/F“ proizvođača Fronius, prikazan na slici 51., korišten je kao izvor struje za TIG zavarivanje. Ovaj tip izvora potpuno je digitalno upravljiv AC/DC TIG izvor za zavarivanje koji se može koristiti i za REL zavarivanje. Najveća je jakost struje zavarivanja koju ovaj uređaj može postići 220 A pri intermitenciji od 35 % te ima mogućnost TIG zavarivanja impulsnom strujom. Zbog svoje težine od samo 17,4 kg nalazi se među najlakšim izvorima za zavarivanje na svijetu, zbog čega je vrlo mobilan. Po potrebi, za maksimalna opterećenja, uređaj se dodatno oprema modularnim hladnjakom i TIG-gorionikom s vodenim hlađenjem. [44]



Slika 51. Uređaj za zavarivanje tipa MagicWave 2200 Job G/F

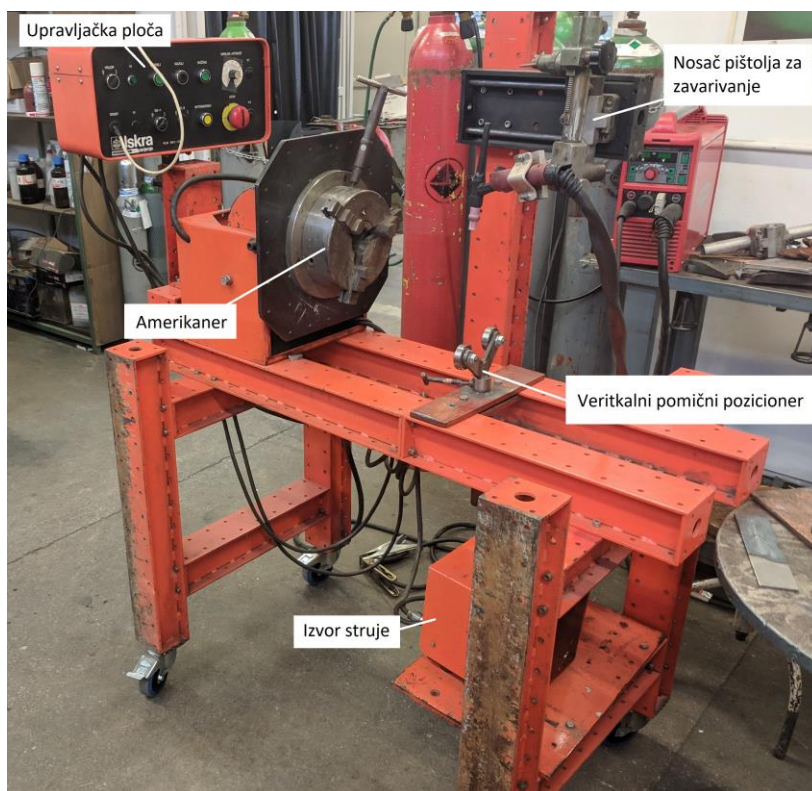
U tablici 8. prikazane se tehničke karakteristike navedenog uređaja za zavarivanje.

Tablica 8. Karakteristike uređaja za zavarivanje MagicWave 2200 Job G/F [44]

Vrsta izvora struje	MagicWave 2200 Job G/F
Priključni napon	230 V (-20 % / +15 %), 50 Hz
Strujni opseg TIG – AC/DC [A]	3 – 220
Strujni opseg REL [A]	10 – 180
Struja zavarivanja [A]	max 220
Intermitencija [%]	35 (220A)
Napon praznog hoda [V]	88
Stupanj zaštite	IP 23
Dimenzije [mm]	485 x 180 x 390
Težina [kg]	17,4

6.3.2. Okretaljka

Na slici 52. prikazana je korištena okretaljka proizvođača „Iskra varjenje“ iz Ljubljane. Dan je prikaz osnovnih dijelova okretaljke. Tokom procesa zavarivanja zadaća je okretaljke okretanje cijevi za 360° konstantnom brzinom kako bi se postigao jednoličan zavar cijelom dužinom. Prilikom pozicioniranja cijevi u okretaljku potrebno je paziti da je cijev u vodoravnom položaju i dobro pričvršćena u amerikaner.



Slika 52. Okretaljka proizvođača „Iskra varjenje“

6.3.3. Zaštitni plin

Cilj ovog eksperimenta bila je usporedba zavora šavnih cijevi iz nehrđajućeg čelika korištenjem čistog argona kao zaštitnog plina u jednom slučaju te mješavina argona i vodika u drugom.

Prvi zaštitni plin koji je korišten je 100 % argon naziva, Argon 4.8, proizvođača „Messer“. Stupanj čistoće argona je > 99,996 %, bez mirisa je i nije zapaljiv. Prema normi ISO 14175 ovaj plin pripada grupi II te se koristi pri TIG/MIG zavarivanju aluminija, visokolegiranih čelika i čelika na bazi nikla.

Kao drugi zaštitni plin koristila se mješavina 95 % argona i 5 % vodika, proizvođača Messer i naziva Inoxline H5. Prema normi ISO 14175 ovaj plin pripada grupi R1. Bezbojan je, izrazito zapaljiv i eksplozivan, teži od zraka i komprimiran. Koristi se kod TIG zavarivanja austenitnih Cr-Ni čelika.

Protok zaštitnog plina pri izvođenju svih pokusa iznosio je 12 l/min.

6.3.4. Netaljiva volframova elektroda

Prema debljini materijala i jačini struje odabrana je volframova elektroda legirana s torijevim oksidima. Ovaj tip elektrode ima dug vijek trajanja, otporan je na veće vrijednosti struje i ima stabilan električni luk kod istosmjerne (DC) struje. Promjer je elektrode 2,4 mm, a dodatni se materijal ne koristi. Električni luk dobiven ovom elektrodom ima karakteristike uske i duboke penetracije u osnovni materijal. Razmak je između vrha elektrode i radnog komada 3 mm.

6.4. Zavarivanje

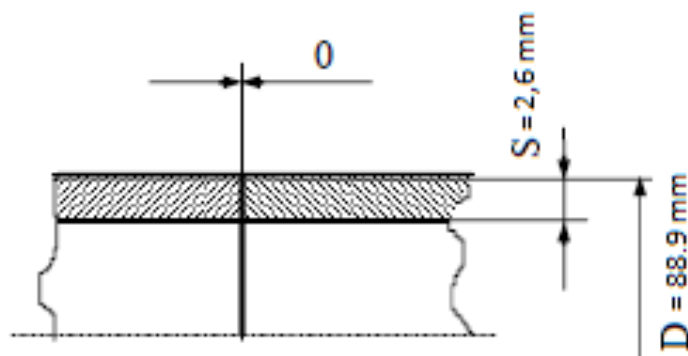
6.4.1. Priprema spoja

Čišćenje i priprema površine važno je za kvalitetu zavarenog spoja. U ovom eksperimentu priprema je izvršena obradom odvajanjem čestica (tokarenjem ruba cijevi kako bi se dobila ravna površina potrebna za sučeljeni spoj). Poslije obrade odvajanjem čestica radni je komad prvo očišćen četkanjem od grubljih nečistoća, nakon čega je područje zavara ručno obrušeno brusnim papirom s vanjske i unutarnje strane te je na kraju uslijedilo čišćenje etilnim alkoholom kako bi se odstranile sve preostale nečistoće i odmastila površina (slika 53.).



Slika 53. Sredstva za pripremu površine osnovnog materijala

Na slici 54. prikazana je priprema šavnih cijevi za zavarivanje sa sučeljenim spojem s „I“ pripremom. Potrebno je voditi računa o tome da su cijevi vodoravno poravnate te da je zračnost najmanja moguća. Prije postupka zavarivanja cijevi su zavarene u tri točke kako bi se onemogućilo eventualno pomicanje cijevi tokom postupka.



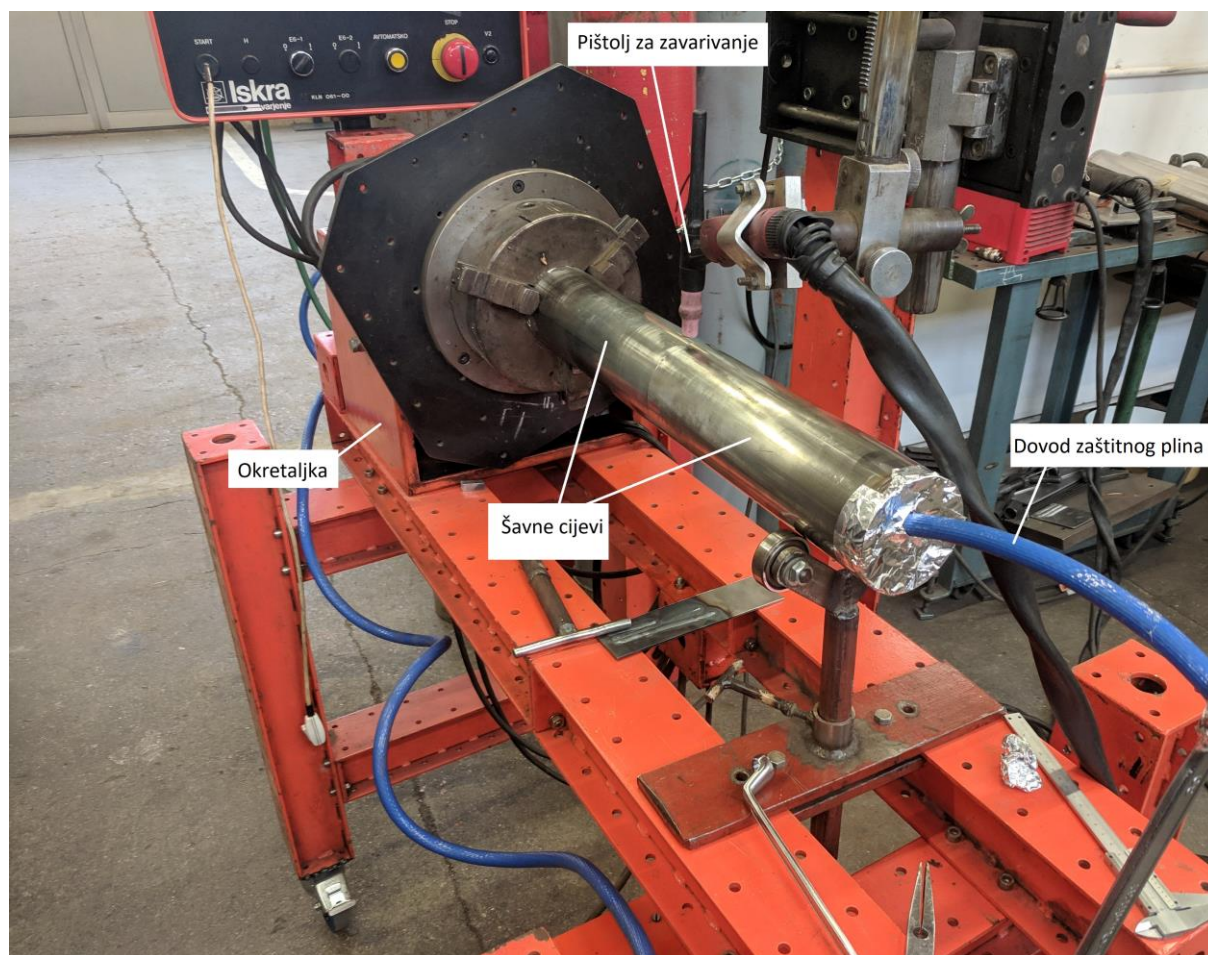
Slika 54. Sučeljeni spoj s „I“ pripremom

6.4.2. Proces zavarivanja

Nakon završene pripreme zavarenog spoja uslijedilo je namještanje parametara TIG zavarivanja. Zavarivanje oba para cijevi provedeno je u jednom prolazu, istosmjernom strujom (DC) s elektrodom na minus (-) polu. Krajevi cijevi zatvoreni su aluminijskom trakom kako bi se zaštitni plin zadržao s korijenske strane zavara. Na suprotnoj strani od dovoda zaštitnog plina izbušene su rupice kako bi se osigurao protok plina te tako spriječilo izbijanje taline prema površini. Zavarivanje je izvedeno pištoljem pod nagibom od 90° koji je pričvršćen za nosač kako bi se osigurali isti uvjeti zavarivanja kod oba uzorka. Udaljenost je elektrode od radnog komada 3 mm. Slika 55. prikazuje stanje postupka neposredno prije samog zavarivanja.

Najveći je problem kod postupka zavarivanja bio pronaći optimalne parametre zavarivanja, odnosno struju zavarivanja i brzinu pri kojoj će kod TIG postupka za odabrani materijal doći do provara u jednom prolazu.

Pri zavarivanju prvog para cijevi korištena je mješavina 95 % argona i 5 % vodika (Inoxline H5), dok je kod drugog para cijevi korišten čisti argon (Argon 4.8). Ista vrsta plina koristi se za zaštitu korijena i lica zavara u svakom od postupaka. Postupak pripreme spoja i sam postupak identičan je u oba slučaja izuzev vrste zaštitnog plina. Prije početka zavarivanja potrebno je pustiti zaštitni plin kako bi se uklonila nepoželjna atmosfera u području zavara te nakon završetka zavarivanja potrebno je ostaviti protok plina određeno vrijeme kako ne bi došlo do kontaminacije završetka zavara iz atmosfere.



Slika 55. Prikaz stanja neposredno prije početka zavarivanja

6.4.2.1. Parametri zavarivanja

Konstantni parametri korišteni kod oba postupka zavarivanja su:

- protok plina: 12 l/min,
- brzina zavarivanja: $v = 47,85$ cm/min
- jakost struje zavarivanja: $I = 185$ A
- vrsta i polaritet struje: DC -
- udaljenost vrha elektrode od radnog komada: $l = 3$ mm,
- promjer elektrode: $d = 2,4$ mm,
- broj prolaza: 1 i
- neutralna tehnika zavarivanja (nagib pištolja od 90°)

U tablici 9. prikazani su primijenjeni parametri za oba para cijevi.

Tablica 9. Primijenjeni parametri pri zavarivanju

Uzorak	Postupak zavarivanja	Zaštitni plin (lice i korijen zavora)	Brzina zavarivanja, cm/min	Jakost struje, A	Napon, V	Unos topline, kJ/cm
1	141	95% Ar + 5 % H ₂	47,85	185	13,4	1,86
2	141	100 % Ar	47,85	185	12,2	1,69

Unos topline u zavar računa se prema formuli [11]:

$$Q = \frac{k \times U \times I \times 60}{v_z \times 1000}$$

gdje je:

Q – unesena toplota [kJ/mm]

U – napon zavarivanja [V]

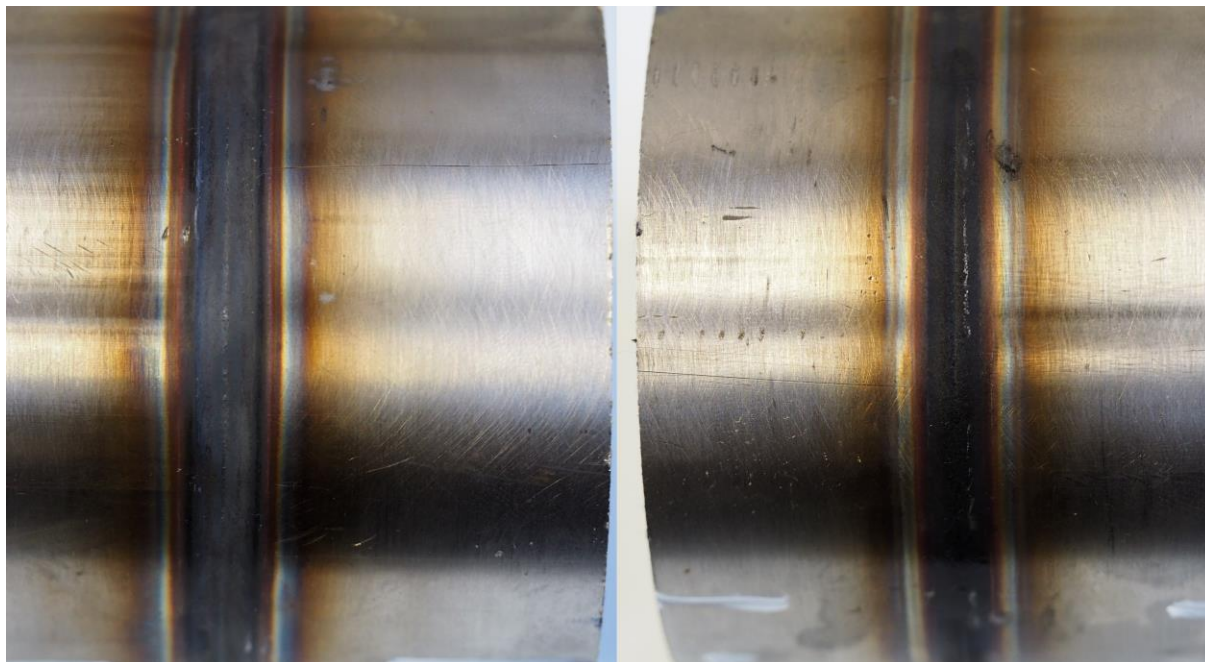
I – jakost struje zavarivanja [A]

v_z – brzina zavarivanja [mm/min]

k – koeficijent toplinske iskoristivosti postupka zavarivanja ($k = 0,6$ za TIG postupak)

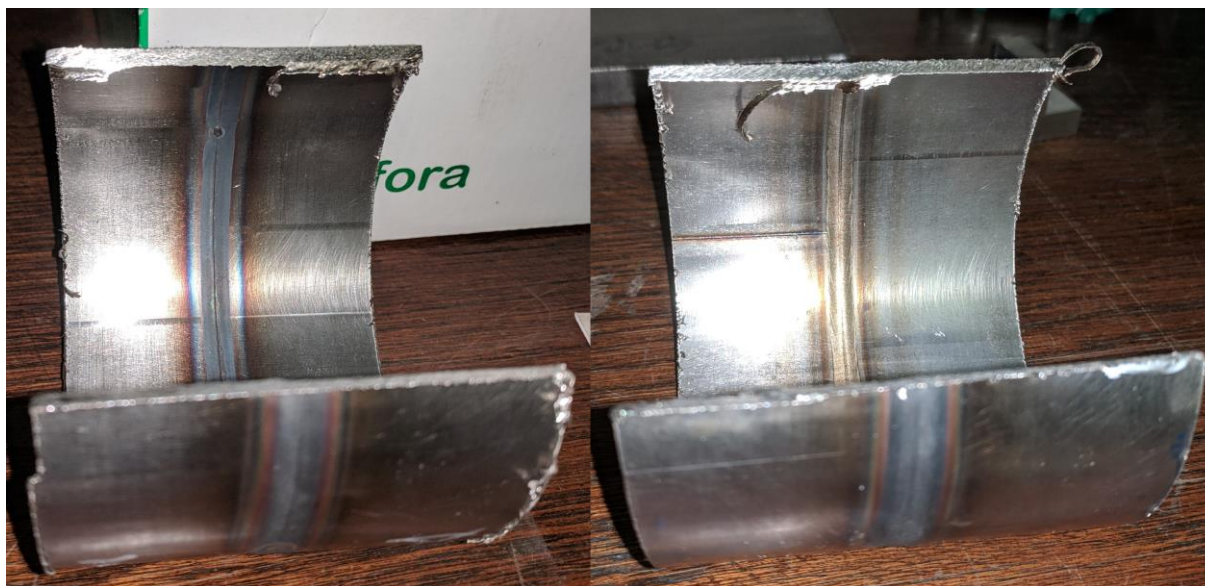
6.4.3. Rezultati zavarivanja

Na slici 56. prikazan je izgled lica oba zavora. Nakon postupka zavarivanja i hlađenja iz zavarenih cijevi izrezane su epruvete na kojima će se vršiti daljnja ispitivanja.



Slika 56. Prikaz lica zavora (zaštitni plin Inoxline H5 – desno, zaštitni plin Argon 4.8 – lijevo)

Na slici 57. prikazan je izgled korijena oba zavora.



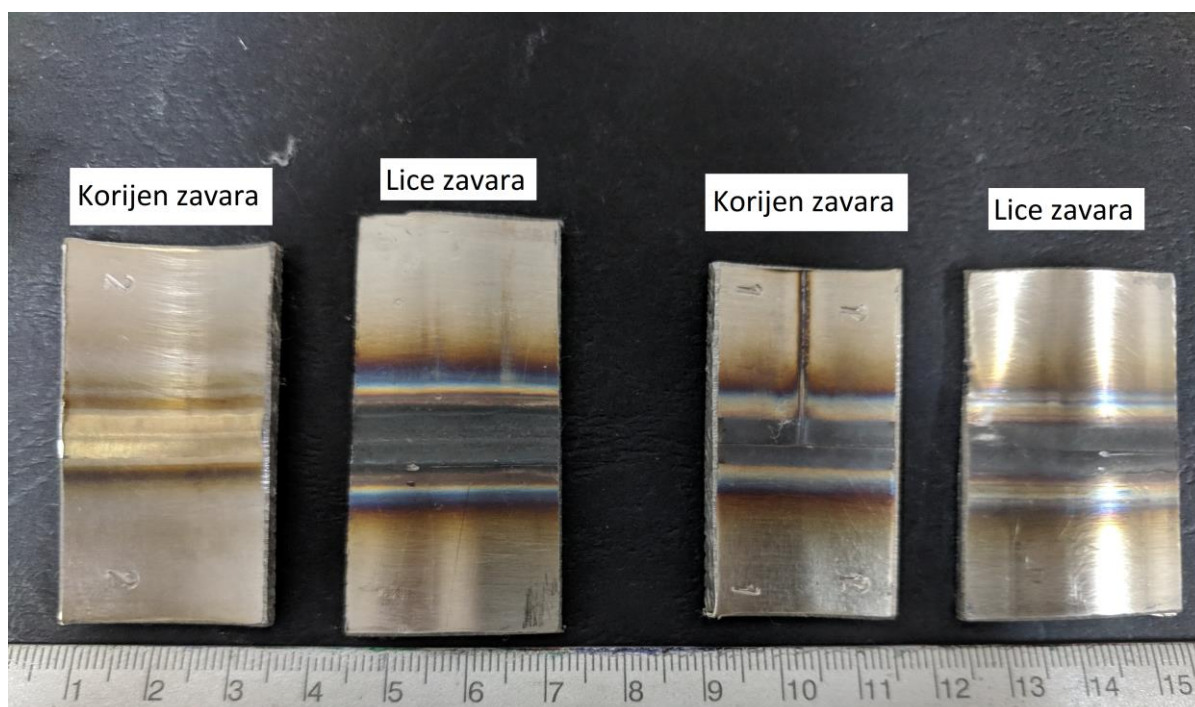
Slika 57. Prikaz korijena zavora (zaštitni plin Inoxline H5 – desno, zaštitni plin Argon 4.8 – lijevo)

6.5. Izrada uzoraka za ispitivanja

Nakon provedenog zavarivanja potrebno je iz velikih uzoraka izrezati manje na kojima se radi makroizbrusak te kasnije geometrija zavora i ispitivanje otpornosti na koroziju. Izrezivanje se obavilo na tračnoj pili IMET GBS 185 ECO (slika 58.). Izgled epruveta nakon rezanja i brušenja prikazan je na slici 59.



Slika 58. Izrezivanje uzoraka



Slika 59. Izrezani uzorci za korozijska ispitivanja (zaštitni plin Inoxline H5 – lijeva dva uzorka, zaštitni plin Argon 4.8 – desna dva uzorka)

Nakon rezanja uzorak se zalijeva u plastiku te je spreman za brušenje kako bi se dobila sjajna površina na kojoj je vidljiva penetracija na temelju koje se mogu dati zaključci o utjecaju zaštitnog plina (slika 60.). Brušenje kreće papirom s najvećom granulacijom te se nakon određenog vremena prelazi na finiji brusni papir sve dok se ne dođe do brusnog papira najmanje granulacije.

Kako bi se još više izrazile linije između metala zavara i osnovnog materijala, nakon brušenja kojim se dobije glatka površina na kojoj je vidljiva penetracija u osnovni materijal, uzorci se nagrizzaju u 10 % oksalnoj kiselini pri 10 V u trajanju od 50 sekundi, nakon čega se ispiru u toploj vodi kako bi se prekinula reakcija.



Slika 60. Makroizbrusak u plastici (zaštitni plin Inoxline H5 – dolje, zaštitni plin Argon 4.8 – gore)

6.6. Ispitivanja i analiza

6.6.1. Vizualna kontrola

Vizualna kontrola jednostavna je metoda osiguranja kvalitete zavaraz bez razaranja koja služi za otkrivanje niza površinskih grešaka poput pojave korozijskih produkata, kontaminacije, greške spojeva (nadvišenja, obojenja zavaraz, krateri/ugorine, površinske pukotine, ulegnuća, itd.). Ispitivanje može biti s ili bez pomoćnih uređaja i opreme. Najčešća je i najbitnija primjena vizualne kontrole golim okom i to prije, tijekom i nakon zavarivanja.

Prije zavarivanja provjerava se čistoća pripremljenog spoja, poravnavanje uzoraka, pozicija pištolja iznad cijevi te je li ispario sav etanol korišten za čišćenje. Tokom zavarivanja prati se ponašanje taline koja je u oba slučaja bila uobičajena za TIG postupak zavarivanja.

Na slici 59. prikazana su četiri uzorka zavarivanja, po dva za svaki od provedenih postupaka. Lijeva dva uzorka zavarivana su uz zaštitni plin Inoxline H5, dok su desna dva uzorka zavarena uz zaštitni plin Argon 4.8. Za svaki postupak zavarivanja prikazan je uzorak lica i korijena zavaraz.

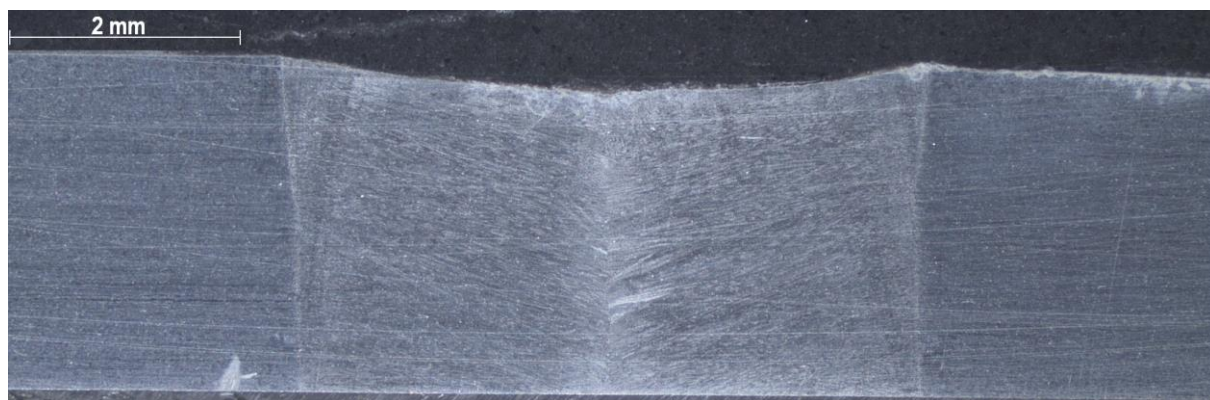
Iz slike 59. može se odmah uočiti da kod postupka zavarivanja s argonom kao zaštitnim plinom nije došlo do potpune penetracije zavaraz, odnosno provara korijena zavaraz. Na uzorku korijena zavaraz jasno se vide linije ruba cijevi, što odmah ukazuje na nedovoljnu penetraciju. Korijen zavaraz kod uzorka s Inoxline H5 zaštitnim plinom u potpunosti je provaren te je vidljiva razlika u boji korijena zavaraz.

Lice zavaraz kod postupka zavarivanja s Inoxline H5 zaštitnim plinom tamnije je boje te je uočeno lagano ulegnuće lica zavaraz, što se vidi i na makroizbrusku.

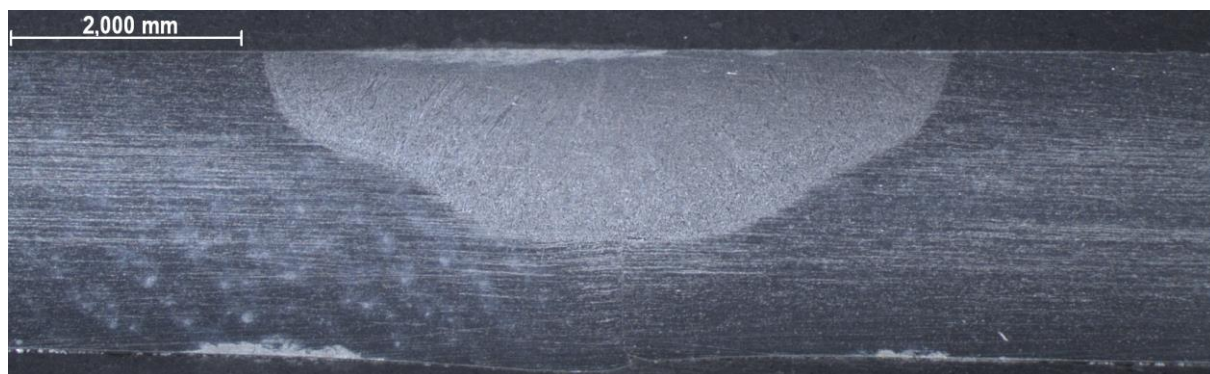
6.6.2. Makroanaliza

Uvid u geometriju zavarenog spoja, zona taljenja materijala i intenzitet taljenja osnovnog materijala dobiva se izradom makroizbruska. Ispitivanje makroizbruska sastoji se od vizualnog pregleda poprečnog presjeka uzoraka ili uz pomoć mikroskopa. Kod ovog tipa ispitivanja izmjere se nadvišenja, ulegnuća, širine lica i korijena zavaraz na uzorcima (slika 61. i slika 62.).

Fotografiranje geometrije zavaraz na makrouzorcima napravljeno je na mikroskopu Leica MZ6 uz pomoć programskog paketa eng. *Lieca Application suite version 3.2.0.*, uz povećanje od 12,5.



Slika 61. Makroizbrusak (zaštitni plin Inoxline H5)



Slika 62. Makroizbrusak (zaštitni plin Argon 4.8)

U tablici 10. dan je pregled geometrijskih značajki makroizbrusaka za oba slučaja.

Tablica 10. Geometrijske značajke zavora

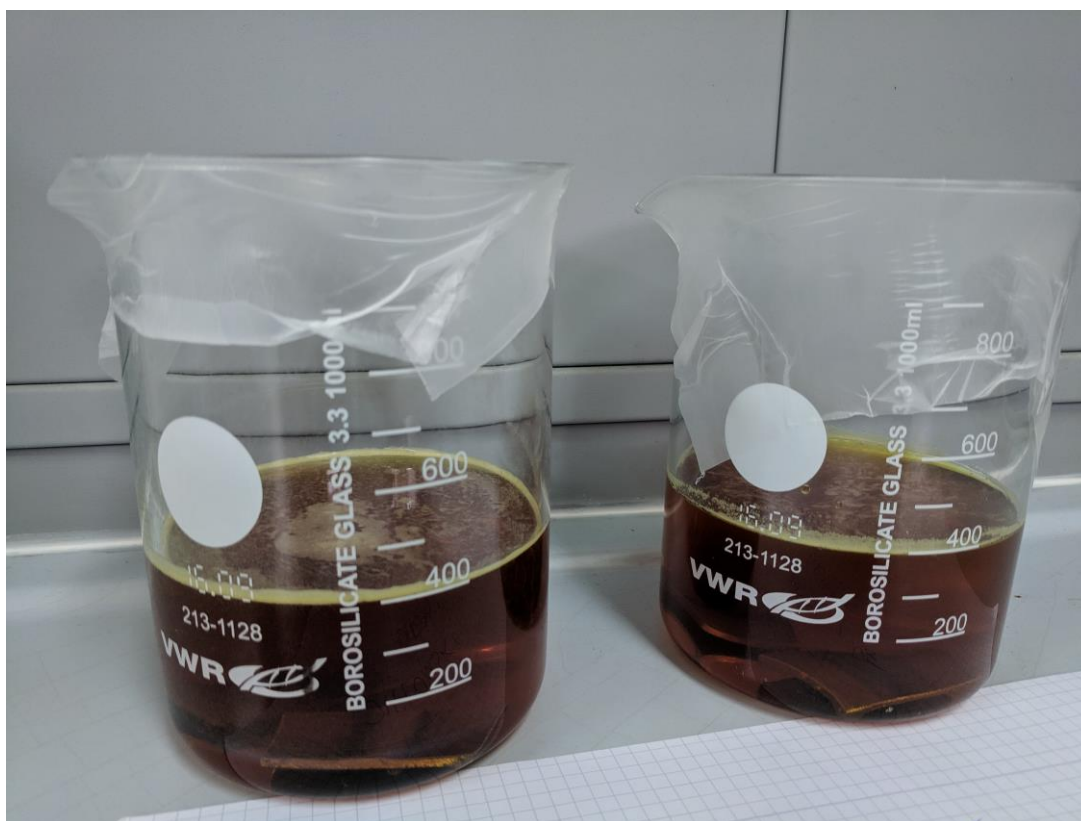
Makroizbrusak	Zaštitni plin	Širina lica	Širina korijena	Penetracija	Ulegnuće
Uzorak 1	Inoxline H5	5,70 mm	5,38 mm	Potpuna	0,30 mm
Uzorak 2	Argon 4.8	6 mm	-	1,75 mm	-

Kod oba uzorka nisu vidljive nikakve greške u metalu zavora, odnosno nehomogenosti po poprečnom presjeku. Iz slike 62. vidljivo je da penetracija nije bila dovoljna te da nije došlo do provarivanja korijena. Dubina penetracije uzorka 2 iznosi 1,75 mm (67% protaljenosti osnovnog materijala), dok je kod uzorka 2 protaljen cijeli uzorak. Na uzorku 1 (slika 61.) vidljivo je ulegnuće, odnosno propadanje taline u korijen zavora, do kojeg je došlo zbog nekorištenja dodatnog materijala. Širina lica zavora nešto je manja kod uzorka 1 u odnosu na uzorak 2 (za 5 %).

6.6.3. Korozijska ispitivanja

Provedeno je neelektrokemijsko ispitivanje prema normi ASTM G 48 u Laboratoriju za zaštitu materijala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Uzorci su uspoređeni prije i nakon izlaganja 10 % - tnoj otopini željezovog (III) klorida ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) u trajanju od 72 sata na sobnoj temperaturi.

Prije početka ispitivanja provedena je priprema uzoraka odmašćivanjem alkoholom te su uzorci prije uranjanja u agresivnu otopinu vidljivi na slici 59. Nakon uranjanja uzoraka u agresivnu otopinu (400 mL otopine) posuda je zabrtvljena te ostavljena na sobnoj temperaturi u trajanju od 72 sata (slika 63.).



Slika 63. Prikaz uzoraka u agresivnoj otopini neposredno nakon uranjanja

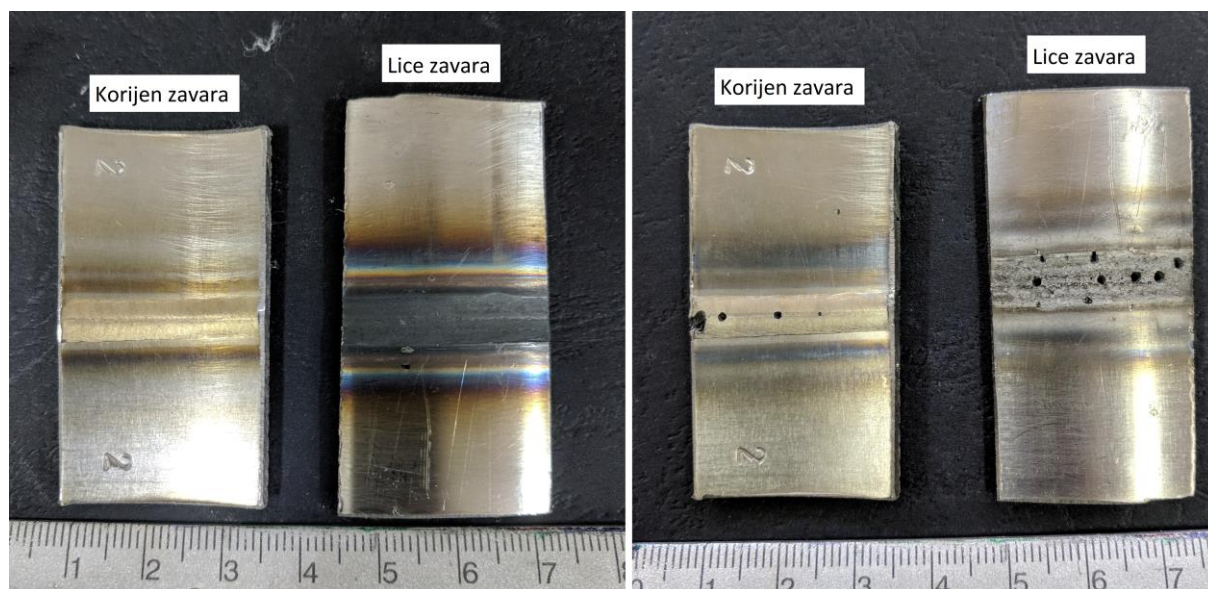
Nakon 72 sata uzorci su izvađeni iz otopine, oprani, osušeni te im je prebrojen broj rupica. Prikaz boje otopine nakon 72 sata pri sobnoj temperaturi dan je na slici 64., na kojoj se vidi tamnija boja otopine, što ukazuje na uspješnu reakciju.

Parametri koji utječu na ocjenjivanje stanja površine kod rupičaste korozije su gustoća rupica, njihova veličina i dubina. U ovom slučaju vizualno je moguće utvrditi i bez detaljne analize koji uzorak posjeduje veću otpornost rupičastoj koroziji.



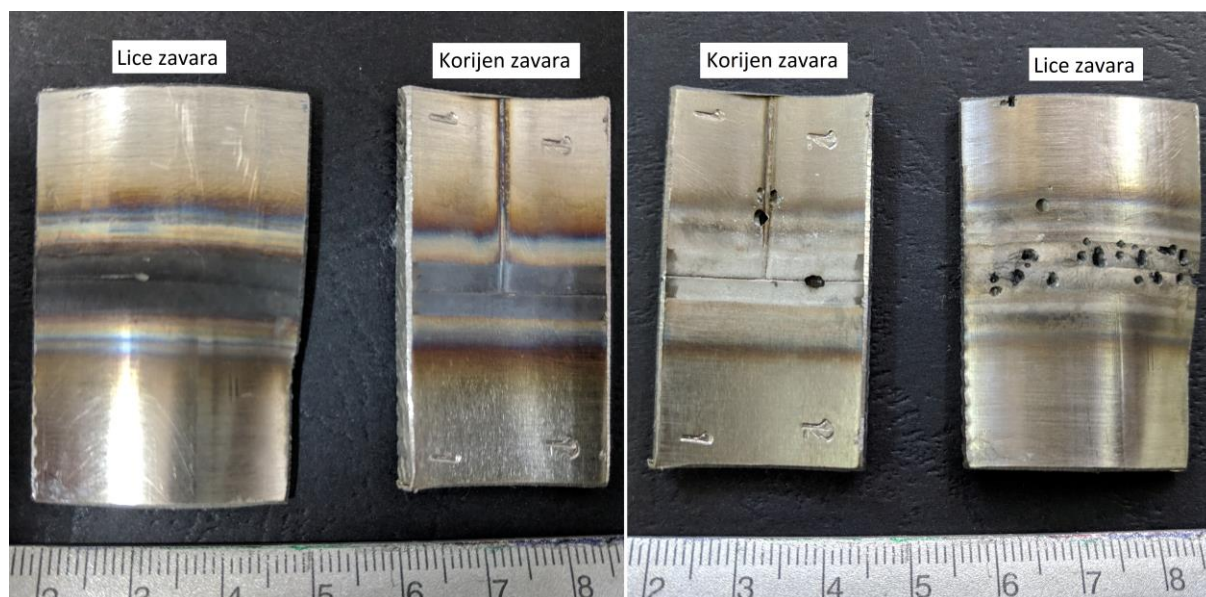
Slika 64. Prikaz uzoraka u agresivnoj otopini neposredno prije vađenja

Na slici 65. prikazana je usporedba zavora prije i nakon ispitivanja za uzorak zavarivan s Inoxline H5 kao zaštitnim plinom.



Slika 65. Usporedba zavora prije i poslije ispitivanja (zaštitni plin – Inoxline H5)

Na slici 65. jasno je vidljivo da je lice zavora pretrpjelo veću štetu, nego korijen zavora. Prikaz usporedbe zavora prije i nakon ispitivanja za uzorak zavarivan s Argon 4.8 kao zaštitnom plinom dan je na slici 66.



Slika 66. Usporedba zavora prije i poslije ispitivanja (zaštitni plin – Argon 4.8)

Kao i u slučaju kod uzorka zavarivanog uz Inoxline H5 kao zaštitni plin lice zavora pretrpjelo je veću štetu, nego korijen zavora. U ovom slučaju vidi se i pojava rupica na području izvan zone obojenja na korijenskoj strani zavora.

U tablici 11. dana je usporedba korozijske postojanosti oba uzorka te njihova usporedba.

Tablica 11. Usporedba korozijske postojanosti zavora uz korištenje različitih zaštitnih plinova

Uzorak	Zaštitni plin	Broj rupica na licu zavora	Broj rupica na korijenskoj strani zavora
1	Argon 4.8	20	4
2	Inoxline H5	9	4

Na uzorku 1 vidi se pojava triju rupica na rubnom području zone obojenja, odnosno na zavaru cijevi iz faze proizvodnje, jer se radi o šavnim cijevima. Šavne cijevi spajaju se uzdužnim sučeljenim zavarivanjem zbog čega je i na području šava moguća pojava rupičaste korozijske.

S obzirom da je broj rupica na licu zavora duplo veći kod uzorka 1 (zaštitni plin - Argon 4.8), nego kod uzorka 2, zaključujemo da je zavarivanje uz Inoxline H5 kao zaštitni plin pogodnije s gledišta otpornosti na rupičastu korozijsku.

7. ZAKLJUČAK

Pojam nehrđajući čelici ili korozijski postojani čelici danas obuhvaća vrlo širok raspon legura nudeći tako velike mogućnosti korisnih svojstava. Primjenjuju se u gotovo svim granama ljudskog djelovanja, od farmaceutske, kemijske i petrokemijske industrije, u brodogradnji, medicini itd., što je garancija da će se nastaviti s razvojem i unapređenjem trenutnih materijala.

Kako bi se postigla odgovarajuća korozijska otpornost zavarenog spoja, potrebno je tijekom cijelog procesa zavarivanja, počevši od pripreme spoja, odabira postupka i parametara zavarivanja, zaštitnih i pomoćnih plinova, kao i odgovarajućeg dodatnog materijala, uvažavati pojedine specifične zahtjeve ovih skupina konstrukcijskih materijala. Iako se nazivaju korozijski postojanim, to nužno ne znači da imaju sigurnu zaštitu od korozijskih oštećenja.

U ovom radu razrađena je detaljna podjela i primjena nehrđajućih čelika u zavarenim konstrukcijama te je detaljno opisan TIG postupak zavarivanja. Dan je pregled primjene i podjele zaštitnih plinova za TIG zavarivanje nehrđajućih čelika i pregled karakterističnih korozijskih problema kod nehrđajućih čelika.

U eksperimentalnom dijelu provedeno je automatizirano zavarivanje cijevi iz nehrđajućeg čelika (AISI 316L) uz primjenu dvaju različitih zaštitnih plinova (Inoxline H5 i Argon 4.8). Nakon vizualne kontrole izrađen je makroizbrusak na kojem se vidi presjek zavora u oba slučaja te je provedeno ispitivanje otpornosti na rupičastu koroziju.

Cilj ovog eksperimentalnog rada bio je utvrditi razlike u geometriji zavora i otpornost na koroziju u dvama slučajevima u kojima je jedina razlika korišteni zaštitni plin. Nakon provedenog eksperimenta možemo zaključiti da je zavarivanje provedeno uz zaštitni plin Inoxline H5 te iste ostale parametre zavarivanja kao i u slučaju s Argon 4.8 kao zaštitnim plinom, ostvarilo bolju penetraciju i kvalitetu zavora te se pokazalo da zavareni spoj ima bolju i korozijsku postojanost. Uzrok tome je vodik u mješavini zaštitnog plina jer ima najveću toplinsku vodljivost što rezultira boljim prijenosom topline do zavora kroz električni lik, čime se dobiva bolja penetracija i čistoća zavora te se ostvaruje reducirajuća atmosfera koja otklanja kisik i okside iz zone zavora čime se smanjuje stupanj oksidacije površine.

LITERATURA

- [1] Otokumpu Stainless AB: Handbook of Stainless Steel, Avesta Resarch Centre, Avesta, Sweden, 2013.
- [2] Juraga, I., Šimunović, V., Stojanović, I.: Zavarivanje Cr-Ni čelika, korozijaska postojanost, rukovanje, Pula, 2007
- [3] <http://www.acroni.si/en/?subpageid=3>, dostupno 17.06.2018.
- [4] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB Zagreb, 2011.
- [5] Juraga, I.: Zavarivanje čelika otpornih na koroziju, Časopis Zavarivanje, siječanj 1994.
- [6] Kearns, W. H.: Welding Handbook, Materials and their weldability, seventh edition, vol.4
- [7] Kožuh, S.: Skripta - Specijalni čelici, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak, 2010.
- [8] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB Zagreb, 2011.
- [9] Kožuh, S.: Skripta - Specijalni čelici, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak, 2010.
- [10] Lippold J.C., Kotecki D.J. : Welding Metallurgy and Weldability Of Stainless Steels, 2005.
- [11] Živčić, M.: Časopis zavarivanje 1/2/3/ 85g. - TIG zavarivanje, Društvo za tehniku zavarivanja Hrvatske, FSB, Zagreb, 1985.
- [12] Čolić, L.: Robotizirano zavarivanje nehrđajućih čelika A – TIG postupkom, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [13] <http://www.jelenic1948.com/index.php/2015/06/14/remontno-zavarivanje/>, dostupno 11.9.2018.
- [14] Babić, N.: Utjecaj sastava aktivacijskog premaza na svojstva navara pri robotiziranom A – TIG navarivanju čelika AISI 304, Zagreb, 2015.
- [15] Horvat, M., Kondić, V., Brezovečki, D.: Teorijske i praktične osnove TIG postupka zavarivanja, Technical journal 8, 4(2014), 426-432, 2014.
- [16] <http://www.millerwelds.com/resources/TIGhandbook/>, dostupno 8.10.2016.
- [17] Vručinić G.; Časopis zavarivanje 4/ 84g. - Impulsni TIG postupak zavarivanja, Društvo za tehniku zavarivanja Hrvatske, FSB, Zagreb, 1984.
- [18] Handbook for GTAW – Gas Tungsten Arc Welding, AWS, 1987.
- [19] Kralj, S.: Skripta za učenje iz kolegija Zavarivanje 1, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [20] Garašić I.; Službena predavanja iz predmeta Zavarivanje i montaža, FSB, Zagreb, 2014.
- [21] Grbin M., Kovačević B., Živčić M.: Elektrolučno zavarivanje u zaštiti plinova, UNIMEX, d.o.o., Zagreb, 1996
- [22] H. B. Cary, S. C. Helzer: Modern welding technology, Upper Saddle River, New Jersey, 2005.
- [23] <https://www.diamondground.com/TungstenGuidebook.pdf>, dostupno 20.02.2017.
- [24] <http://www.industrysearch.com.au/Products/TIG-Cold-Wire-Feeder-Model-TIGer>, dostupno 11.10.2018.

- [25] Kralj S., Radošević B., Kožuh Z., Garašić I.: Strojevi i oprema za zavarivanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2013. godina
- [26] Čordaš D.: Orbitalno zavarivanje nehrđajućih čelika TIG postupkom, vlastita naklada, Pula, 2007.
- [27] http://www.messergroup.com/mostar/O_nama/Za__titni_plinovi_za_zavarivanje_.pdf, dostupno 22.8.2018.
- [28] Branilović D.; Utjecaj zaštitnog plina pri TIG zavarivanju Cr-Ni čelika na geometrijske značajke zavara, Završni rad 2011., FSB
- [29] Welding Handbook-eight edition-Gas Tungsten arc welding, 1997., AWS
- [30] Fontana, M. G.: Corrosion Engineering (third edition), McGraw Hill 1987.
- [31] Kreković, D.: Korozijska otpornost zavarenih spojeva dupleks čelika, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [32] Juraga, I., Alar, V., Šimunović, V.: Korozijska oštećenja na konstrukcijama od Cr-Ni čelika – mogućnosti izbjegavanja, Seminar: Nehrđajući čelici, Zagreb, 2010.
- [33] Kožuh, S.: Skripta - Specijalni čelici, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak, 2010.
- [34] Bobić B., Jegedić B.: Zaštita materijala 46, Vojno tehnički institut SCG, Beograd 2005.
- [35] R. H. Jones; "Stress-corrosion cracking", ASM International, Materials Park, 1992.
- [36] The Welding Institute: Tečaj za međunarodne inženjere i tehnologe zavarivanja, Postupci zavarivanja i oprema za zavarivanje, listopad, 2012.
- [37] <https://www.centrometal.hr/wp-content/uploads/2017/09/automat-inox.jpg>, dostupno 5.11.2018.
- [38] Kah P., Martikainen J.: Influence of shielding gases in the welding of metals, Springer Int J Adv Manuf Technol (2013.) 64:1411–1421
- [39] <https://www.weldpedia.com/2014/08/10-causes-of-weld-porosity-and-their-practicable-preventions.html>, dostupno 15.10.2018.
- [40] Folchi F.: Weld distortion prediction with virtual analysis for practical applications, University of Windsor, 2014.
(<https://www.collectionscanada.gc.ca/obj/thesescanada/vol2/OWA/TC-OWA-5219.pdf>)
- [41] Gojić M.: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Udžbenici Sveučilišta u Zagreb, 2003.
- [42] Elderfield & Hall: Pro-Fusion, Setting up and determining parameters for orbital tube welding, 10901 McBride Lane, Knoxville TN, 37932.
- [43] Nehrđajući čelici -- 3. dio: Tehnički uvjeti isporuke za poluproizvode, šipke, valjanu žicu, vučenu žicu, profile i svijetlo vučene proizvode od korozijski postojanih čelika za opće namjene (EN 10088-3:2014)
- [44] http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/fronius_international/hs.xsl/79_7406_ENG_HTML.htm#.WAififl96M8, dostupno 18.11.2018.